

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Vliv volby základny pro hodnocení geometrické tolerance**

**Influence of Base Choice for Geometrical Tolerances  
Evaluation**

Student:

Jiří Kravčík

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Ostrava 2017

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Jiří Kravčík**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Vliv volby základny pro hodnocení geometrické tolerance  
Influence of Base Choice for Geometrical Tolerances Evaluation

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Přehled současného stavu.
3. Rozdělení základen podle norem.
4. Hodnocení a strategie měřících základen.
5. Experimentální část.
6. Zhodnocení výsledků, závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

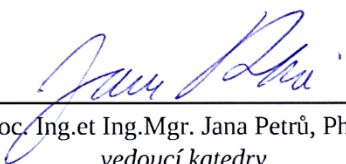
- [1] PETŘKOVSKÁ, L. ; ČEPOVÁ, L. *Metrologie a řízení kvality*. Ostrava: VŠB-TUO, 2012. 142 s. ISBN 978-80-248-2771-1. Dostupné na <http://projekty.fs.vsb.cz/459/?ucebni-opory>.
- [2] ČEPOVÁ, L.; PETŘKOVSKÁ, L. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Ostrava: Katedra obrábění a montáže FS VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011. 100 s. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [3] OČENÁŠOVÁ, L. *Príspevok k hodnoteniu odchýlky kruhovitosti pri meraní na súradnicovom meracom stroji*. Žilinská univerzita v Žiline – Strojnícka fakulta: Dizertačná práca, 2008.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

  
doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě ..... 15.5.2017 .....

.....  
podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15. 5. 2017

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jiří Kravčík

Adresa trvalého pobytu autora práce: Nová 2064/36, 700 30 Ostrava-Zábřeh

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KRAVČÍK, J. Vliv volby základny pro hodnocení geometrické tolerance: *bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 61 s. Vedoucí práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Předkládaná bakalářská práce se zabývá vlivem volby základny pro hodnocení geometrických tolerancí. V první třetině teoretické části je popsána funkce, rozdělení a konstrukce souřadnicových měřících strojů. Od druhé třetiny teoretické části se práce zabývá geometrickými tolerancemi, postupem měření na souřadnicovém měřícím stroji, úlohou a rozdělením základen. Dále pak jsou popsány metody měření. V závěru se práce zabývá praktickou ukázkou měření jednoduché součásti a vyhodnocením charakteristik elementů na této součásti s důrazem na rozdíl ve dvou odchylkách jedné charakteristiky vyhodnocené od dvou základen.

## ANNOTATION BACHELOR THESIS

KRAVČÍK, J. Influence of Base Choice for Geometrical Tolerances Evaluation : *Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2017, 61 p. Thesis head: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

The presented bachelor thesis is focused on the influence of base choice for geometrical tolerances evaluation. In the first third of theoretical part there is a description of coordinate measuring machines, their function and construction. From the second third of theoretical part the thesis is focused on geometrical tolerances, measurement process on coordinate measuring machine and the description of bases. Then follows the description of measurement methods. At the end the thesis is focused on practical illustration of measuring a simple component and evaluating the characteristics of the elements on the component with emphasis on difference between two deflections of one characteristic evaluated from two bases.

## **Poděkování**

Ze začátku bych chtěl poděkovat mé vedoucí bakalářské práce Ing. Lence Čepové, Ph.D. za poskytnutí cenných informací a rad při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za finanční i psychickou podporu při studiích.

# Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 MĚŘÍCÍ TECHNIKA VYUŽÍVAJÍCÍ SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM .....</b>	<b>10</b>
1.1 POPIS SOUŘADNICOVÝCH MĚŘÍCÍCH STROJŮ .....	11
1.2 TYPY SOUŘADNICOVÝCH MĚŘÍCÍCH STROJŮ .....	14
1.3 VÝZNAM JEDNOTLIVÝCH SOUČÁSTÍ CMM STROJE A ZPŮSOBY ULOŽENÍ POHYBUJÍCÍCH SE ČÁSTÍ .....	16
1.4 ODMĚŘOVACÍ SYSTÉMY CMM STROJŮ .....	18
1.5 KONTAKTNÍ SNÍMACÍ SYSTÉMY A MĚŘÍCÍ DOTYKY .....	20
1.6 PŘESNOST SOUŘADNICOVÝCH MĚŘÍCÍCH STROJŮ .....	24
1.7 GEOMETRICKÉ TOLEROVÁNÍ.....	25
1.8 PRINCIP A STRATEGIE MĚŘENÍ.....	29
1.9 USTAVENÍ A SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM.....	34
<b>2 ZÁKLADNY A SOUSTAVY ZÁKLADEN .....</b>	<b>36</b>
2.1 TERMÍNY A DEFINICE .....	36
2.2 ZÁKLADNY.....	37
2.3 SOUSTAVY ZÁKLADEN .....	41
2.4 DÍLČÍ ZÁKLADNY .....	44
<b>3 HODNOCENÍ METOD MĚŘENÍ.....</b>	<b>45</b>
3.1 SPOJITÁ METODA .....	45
3.2 NESPOJITÁ (DISKRÉTNÍ) METODA .....	48
3.3 POROVNÁNÍ SPOJITÉ A NESPOJITÉ METODY .....	48
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>49</b>
4.1 VYHODNOCOVÁNÍ PODLE GAUSSE.....	50
4.2 VYHODNOCOVÁNÍ PODLE ČSN EN ISO 5459.....	51
4.3 SROVNÁNÍ OBOU METOD .....	53
4.4 UKÁZKA SKENOVACÍ METODY .....	54
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>56</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>57</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>59</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>61</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>62</b>

## Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Význam	Jednotka
1D	One Dimensional – lineární	
2D	Two Dimensional – dvourozměrný	
3D	Three Dimensional - trojrozměrný	
A	Základna A	
B	Základna B	
CAD	Computer Aided Design – počítačová podpora projektování	
CMM	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj	
$K_n$	koeficient	
L	délka	[mm]
MD	Major Diameter – velký průměr	[mm]
SSP	Souřadnicový systém palety	
SSV	Souřadnicový systém výrobku	
$\varnothing$	průměr	[mm]
$\alpha$	úhel	[°]
$\beta$	úhel	[°]



## Úvod

V dnešní době se průmysl vyznačuje především výrobou součástí s přesností na mikrometry, a to má za následek velmi rychle se rozvíjející obory s touto výrobou spojené. Strojírenská metrologie a přesné měření na souřadnicovém stroji je jeden z těchto oborů. Požadavky na přesnost se stále zvětšují a tím se i nejmenší možná chyba měření projevuje jako velká nepřípustná chyba ovlivňující výsledky celého měření. Souřadnicové měřicí stroje pracující s maximální nejistotou měření pod pár mikrometrů jsou již běžnou součástí výrobního cyklu a poskytují přesnou výstupní kontrolu ve všech možných fázích tohoto výrobního postupu.

Tato bakalářská práce se v úvodu zaměřuje na přehled současného stavu souřadnicových strojů, jejich popis, možné rozdělení typů těchto strojů, jednotlivé funkční prvky a celkovou konstrukci. Dále je popsáno, co je to geometrická tolerance a jaké tolerance lze vyhodnocovat. Princip a strategie měření a také, co je potřeba zajistit před samotným snímáním bodů, ze kterých se vypočtou elementy, jejichž charakteristiky vyhodnocujeme.

Nejdůležitějším tématem, kterým se tato práce zabývá, jsou základny. Seznámit čtenáře s jejich úlohou ve vyhodnocování geometrických tolerancí. Popsat jejich značení, rozdělení, a hlavně vliv volby správné základny ve vyhodnocování.

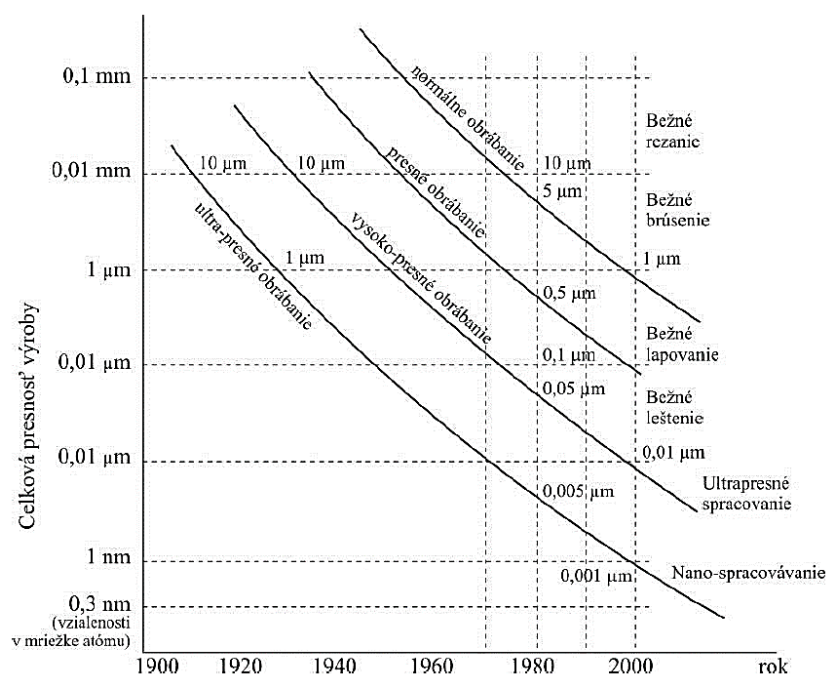
V závěrečné části se tato práce věnuje praktické ukázce dopadu volby základny ve výsledcích vyhodnocované požadované geometrické tolerance podle přílohy A. Dále se zaměřuje na volbu metody vypočítání elementů, jejichž charakteristiky jsou vyhodnocovány a jak se tato volba promítá do výsledků měření.

# 1 Měřicí technika využívající souřadnicový systém

Stroje využívající souřadnicový systém jsou v dnešní době nedílnou součástí každého průmyslového podniku. V době 21. století je přítomnost průběžných a výstupních kontrol výrobků nutností. Zvláště při výrobě s přesností na mikrometry. Právě z tohoto důvodu se jedná o jeden ze škály velmi rychle se rozvíjejících odvětví průmyslu a výrobního cyklu jako celku. Díky své univerzálnosti a flexibilitě se využívají v oblasti letectví, automobilovém průmyslu, výrobě elektroniky, potravinářském průmyslu, zdravotnictví, farmaceutický průmysl, výroba plastových výrobků, výzkumu a spoustě dalších. Lze je umístit jako kontrolní stanoviště ve výrobním cyklu daného produktu, nebo jako laboratorní zařízení poskytující velmi přesné výsledky.[1]

Z historického hlediska je těžké říci, kdy se souřadnicové měřicí stroje CMM (Coordinate Measuring Machine) naplno zařadili do výrobního průmyslu. Za první průkopníky v oboru můžeme považovat C. E. Johanssona a F. H. Rolta, kteří poznali potenciál CMM a popsali jejich funkci v kartézské soustavě. Složitost CMM však v době velkého rozvoje ostatní techniky zapříčinila zpomalení vývoje CMM a jejich přijetí. Začátek využívání CMM jako silného nástroje se řadí do šedesátých let minulého století, kdy výpočetní výkon mikroprocesorů byl natolik výrazný, že spojení CMM s počítačovým zpracováním dat vyústilo ve velice efektivní měřicí kontrolní nástroj.[1,2]

Roku 1983 odhadl profesor Taniguchi trend výrobní přesnosti (obr. 1).[1,2]



Obr. 1 Trend výrobní přesnosti[1,2]

## 1.1 Popis souřadnicových měřících strojů

Hlavní výhoda souřadnicových měřících strojů je rychlost měření, přesnost měření a možnost provádění různých typů měření na jednom stroji, na jedné součásti. Další nemalou výhodou je počítačové zpracování naměřených dat a následné vyhodnocování výsledků v softwaru pro to určeném. Není nutno pracovat s více typy konvenčních starších měřících nástrojů, kde je potřeba odečítat hodnoty z jemných stupnic. Tyto metody jsou často zdlouhavé a náročné. Dnes snad již neefektivní. Software pro zpracování dat získaných z CMM je většinou navržený pro co nejjednodušší ovládání a uživatelsky pokud možno nejprívětivější. Možnost vykreslení zpracovaných dat ve 3D je v dnešní době samozřejmostí. Kontrola daného výrobku může probíhat dvěma způsoby. Prvním způsobem je, že technik dostane k dispozici s výrobkem taktéž výkresovou dokumentaci, odkud čerpá hodnoty, se kterými porovnává naměřené data a stanoví, zda je výrobek v toleranci. Druhý způsob je, že s výrobkem dostane také CAD model a naměřené výsledky se porovnávají v počítači. Tento způsob je ale podmíněn tím, že měřicí software musí umět importovat CAD modely a pracovat s těmito daty. Pokud se CAD model zpracovává v jiném programu než naměřené výsledky, tak se technicky jedná spíše o první způsob porovnávání.[5]

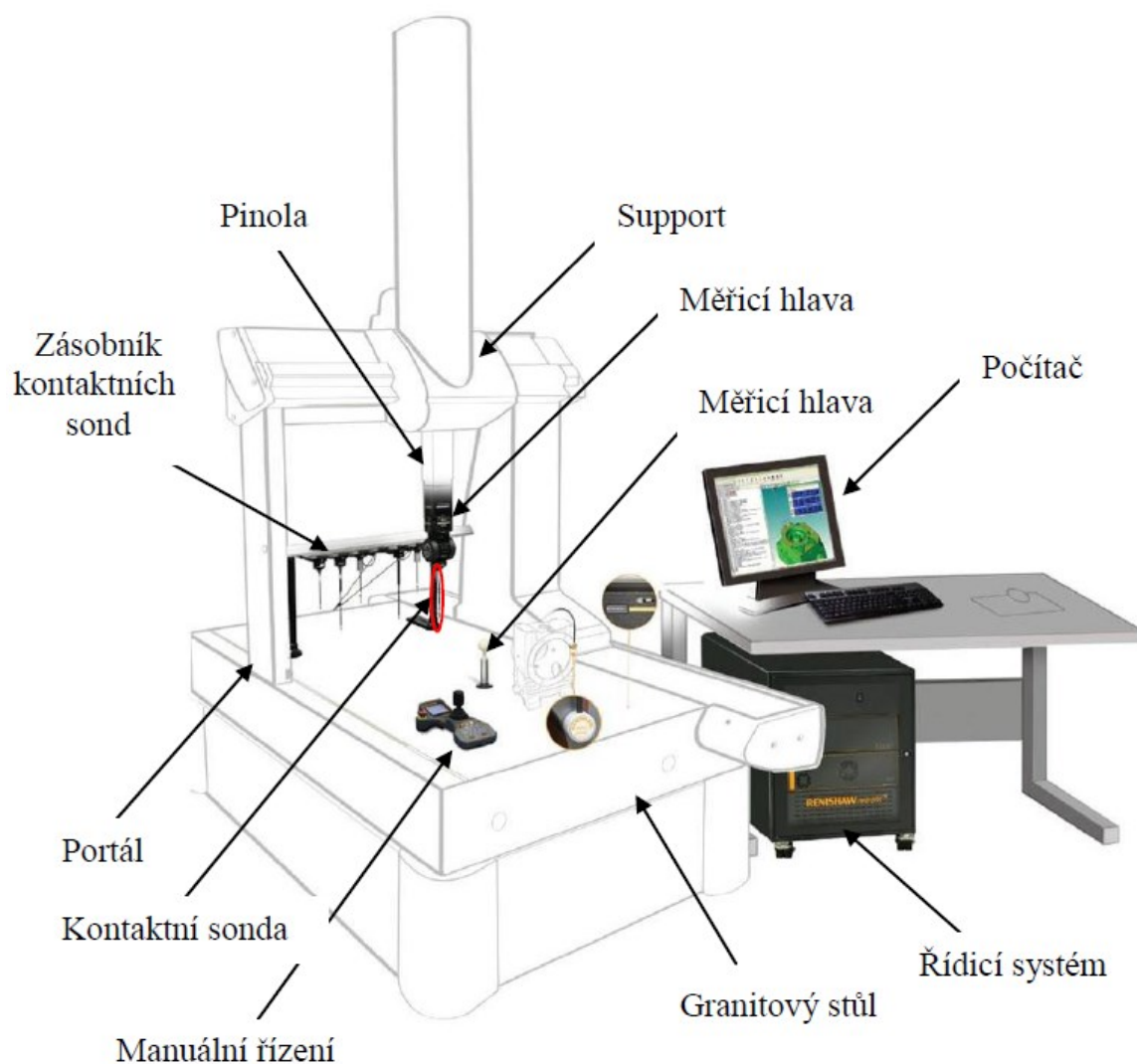


Obr. 2 CMM WENZEL LH 65[5]

Jak je již naznačeno v předchozím odstavci, tak souřadnicové měření se skládá ze dvou hlavních částí. Z měřicího stroje a počítače, ze kterého je možno stroj ovládat, a dále tedy zpracovávat naměřené data (obr. 2).

Avšak samotné CMM se skládá z velmi důmyslných dílčích subsystémů, které jsou navzájem propojené a pro zajištění přesného, spolehlivého a rychlého měření musí bezchybně komunikovat. Jedná se o tyto systémy (obr. 3):

- pohonný systém (mechanická část),
- odměřovací systém,
- snímací systém včetně systému pro výměnu snímačů,
- řídicí systém,
- počítač,
- software[1,2]



Obr. 3 Základní části souřadnicového měřicího stroje[1,2]

Od souřadnicového měření se tedy ve zkratce očekává:

- absolutní a inkrementální měření rozměru ve směru os x, y a z,
- měření vzdálenosti mezi definovanými body,
- určení obrysové křivky z naměřených bodů,
- generování křivek chyb,
- určení geometrických odchylek tvaru a polohy,
- automatické porovnávání požadované a skutečné hodnoty,
- kontrola sdružených součástí,
- výpočet průsečíků os,
- výpočet středů a průměrů děr různými metodami,
- zjištění sklonu osy díry a středu oblouku,
- automatické nastavování naměřených objektů,
- automatická korekce na dotyk,
- transformace souřadnic (kartézské – polární)[1,2]

Další důvod, proč jsou výrobci nadšeni využívat souřadnicové měřicí systémy je, že čas strávený kontrolou dané součásti je zkrácený až o 90%.[1]

Ale aby nasazení souřadnicových měřicích strojů bylo vhodné, a hlavně efektivní, musí být splněno několik podmínek:

**Krátká produkce** – lze produkovat tisíce kusů, ale výrobní série není dostačující, pokud nelze efektivně odůvodnit náklady na inspekční a kontrolní nástroje.

**Multifunkční funkce** – pokud je určitý počet funkcí na kontrolu, pak CMM by měl být nástrojem, který dokáže organizovat jednoduše a ekonomicky.

**Flexibilita** – schopnost vykonávat různá měření téhož výrobku na jednom stroji.

**Vysoké jednotkové náklady** – opětovné opracovávání součástí nebo jejich vyhazování je velmi nákladné, využívání CMM by mělo být prostředkem pro zvýšení produkce akceptovatelných dílů.

**Přerušování výroby** – vyráběná součást musí být v průběhu kontrolovatelná a musí být vyhotoven a akceptován jeden vzorek předtím, než bude následovat další výrobní proces.[1,2,5]

## 1.2 Typy souřadnicových měřicích strojů

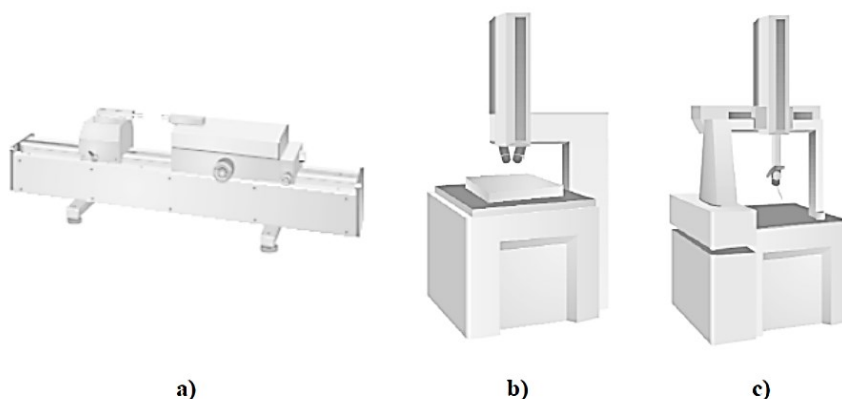
V dnešní době je na trhu celá řada měřicích strojů využívajících souřadný systém. Výrobci musejí uspokojit ne jeden požadavek zákazníka, a tak se dané stroje od sebe liší souřadným systémem, velikostí, tvarem, přesností, snímacími a odměřovacími systémy a cenou. Při pořizování takového stroje je nutno zvážit celou řadu aspektů.

Souřadnicové stroje mohou být zařazeny do tří základních skupin:

**Jednosouřadnicové stroje (obr. 4a)** – měření probíhá pouze v ose „x“. Avšak lze dosáhnout velké přesnosti 0,6 až 6  $\mu\text{m}$  v celém rozsahu měření. A to i na rozměrově velkých výrobcích.[1,2]

**Dvousouřadnicové stroje (obr. 4b)** – měření na těchto typech strojů je orientováno ve dvou na sobě kolmých osách. Tyto osy jsou v jedné rovině a prakticky se jedná o osy „x“ a „y“. S tímto dvousouřadnicovým systémem pracují nejrozličnější typy mikroskopů, skenerů, profilprojektorů a laserových interferometrů.[1,2]

**Třísouřadnicové stroje (obr. 4c)** – měření je realizováno ve třech na sebe kolmých osách. Osa „x“, osa „y“ a osa „z“. Měření je tedy realizováno v prostoru. Tyto stroje jsou vrcholovými nástroji na poli přesného měření geometricky komplikovaných výrobků. Na jedno upnutí je možné realizovat měření nejrozličnějších tvarových odchylek u jinak velmi složité součásti, jejíž měření by bylo časově velmi náročné, nebo až nemožné.[1,2]



Obr. 4 Typy souřadnicových měřicích strojů[1,2]

a) jednosouřadnicové CMM, b) dvousouřadnicové CMM, c) třísouřadnicové CMM

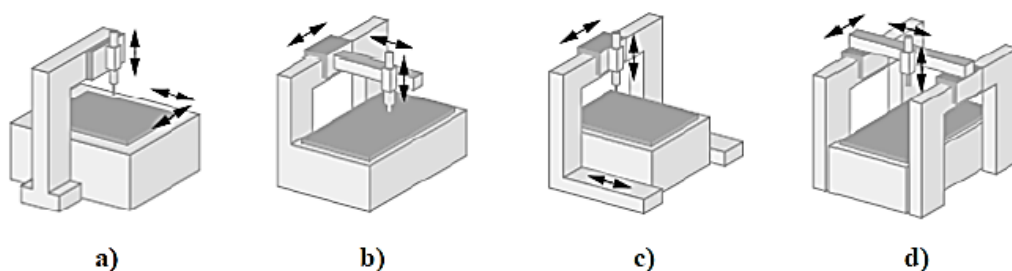
Řadit CMM jenom podle počtu os, ve kterých se pohybují, není pro podrobné rozdělení dostačující, a proto norma ČSN EN ISO 10 360 – 1 udává, že CMM jsou rozdělovány do čtyř základních geometrických uspořádání.[1,2]

**Stojanový (sloupový) typ (obr. 5a)** – tento typ stroje pracuje tak, že se měřený předmět upne na stůl, který se pohybuje ve směru osy „x“ a „y“. Měřicí pinola se pohybuje ve směru osy „z“. CMM stojanového typu je vhodný pro malé rozsahy měření. Řadí se mezi nejpřesnější, v čemž spočívá výhoda tohoto typu. Lze je vybavit deskou s úhlovou stupnicí. Hlavní charakteristický znak stojanového typu CMM je dobrý přístup k měřenému předmětu a úhlová tuhost konstrukce.[1,2]

**Výložníkový typ (obr. 5b)** – výložníkový typ CMM se od stojanového liší tím, že měřený předmět se sice na stůl upíná, ale stůl se nepohybuje. Měřicí pinola je připevněna na rameno, které se pohybuje po ose „x“. Samotná pinola se po ramenu pohybuje po ose „y“ a ose „z“. Protože je rameno zavěšeno z jedné strany, tak vzdálenost, po kterou je schopno měřit je omezená tuhostí samotného ramena. Pokud by došlo k ohnutí, došlo by k chybě měření. Výhodou tohoto typu CMM je vhodnost použití pro dlouhé úzké součásti.[1,2]

**Portálový typ (obr. 5c)** – portálový typ CMM se řadí k nejrozšířenějším CMM vůbec. Je vhodný pro měření středních, až velkých rozsahů. Je však limitován svými rozměry. Výhodou je spolehlivost a přesnost měření stroje pro jeho velkou tuhost, která je zapříčiněna měřicí pinolou pohybující se v osách „y“ a „z“ po portále podepřeném na obou stranách. Vyrábí se ve dvou provedeních. S pohyblivým a pevným portálem. Pohyblivý portál se pohybuje nad pevným stolem ve směru osy „x“, kdežto pevný portál je konstruován tak, aby se pohyblivý stůl posouval po ose „x“.[1,2]

**Mostový typ (obr. 5d)** – posledním typem CMM jsou mostové typy vyznačující se charakteristickým použitím u největších měřených délek (24m a více). Jejich nejčastější využití je v automobilovém nebo leteckém průmyslu.[1,2]



Obr. 5 Základní rozdělení souřadnicových měřících strojů[1,2]

a) stojanový typ, b) výložníkový typ, c) portálový typ, d) mostový typ

Tímto výčet typů souřadnicových měřících strojů nekončí. Výše popsané spadají do kategorie s kartézsky uspořádaným souřadným systémem pro CMM stroje. Další skupinou jsou nekartézsky uspořádané souřadné systémy pro CMM stroje, pod které

spadají různé typy měřících ramen, laserových trackerů a ručních CMM, které pracují s ostatními druhy souřadných systému, jako jsou např. cylindrické nebo sférické.[6]

Pro měření v nekartézsky uspořádaných souřadných systémech se využívá několika způsobů. Mezi nimi, např. měření pomocí kloubových ramen, měření založené na triangulaci nebo měření využívající měření vzdálenosti charakteristických bodů z několika referenčních bodů.[6]

Dále se však těmito typy nebudeme zabývat, neboť nejsou pro tuto práci podstatné.

### 1.3 Význam jednotlivých součástí CMM stroje a způsoby uložení pohybujících se částí

Pro pochopení rozdělení jednotlivých typů CMM strojů je nutné popsat a porozumět významu jednotlivých prvků, ze kterých se CMM stroje skládají. Mezi základní mechanické prvky patří:

**Rám** – svařovaná konstrukce, která nese ostatní prvky mechanického systému stroje. Musí mít co největší tuhost, aby nedošlo k nechtěnému prohnutí rámu, a tím k posunu jednotlivých prvků a ke zkreslení měření. U mostových typů CMM je rám nahrazen deskou v podlaze.[1,2]

**Stůl** – jedná se o základnu pro upnutí měřené součásti. Součást se dá ke stolu upnout přímo, nebo pomocí upínacího přípravku. Stoly jsou nejčastěji vyrobeny z přírodního (žula), nebo umělého (granit) kamene. Alternativou je litinový odlitek. Pracovní část stolu leží na čtyřech podpěrách a horní pracovní plocha je broušená do co největší rovinnosti, aby zase nedošlo ke zkreslení měření. V pracovní ploše jsou závitové, do kterých se šroubují různé typy upínáků, pomocí kterých se upínají měřené výrobky ke stolu a zabezpečují proti nechtěnému pohnutí. Tedy stůl CMM stroje musí splňovat požadované vlastnosti, jako jsou vysoká životnost, objemová stálost, minimální tepelná roztažnost, odolnost proti korozi a možnost opravy v případě poškození.[1,2]

**Sloupy, portály a mostové konstrukce** – důraz se klade na dostatečnou tuhost a rozměrovou a tvarovou stálost. Portály jsou konstruovány na minimální průhyb při posunu pinoly v příčném směru. U některých typů CMM strojů je konstrukce portálu vyhotovena ze žuly nebo granitu.[1,2]

**Most** – je složená uzavřená konstrukce, jejíž stojny tvoří tenkostěnné ocelové profily tvaru L. Překlad mostu tvoří vedení příčných sání.[1,2]



**Pinola** – je to tyč kruhového nebo čtvercového průřezu tvořená z přírodního kamene, keramiky, litiny nebo duralu. Je koncipována horizontálně nebo vertikálně. Avšak horizontálně je zatížena na ohyb od vlastní hmotnosti a hmotnosti snímací hlavy. Pro kompenzaci vodorovné polohy pinoly slouží vyvažovací zařízení minimalizující chyby způsobené rozdílnou délkou vysunutí pinoly. Vyvažování je realizováno mechanicky pomocí dvou souměrných závaží.[1,2]

Protože CMM stroje nejsou jen statické a určené jen na jedno měření, ale dynamické a poskytují komplexní měření různých parametrů u všech možných výrobků různých tvarů a velikostí, musejí se pohybovat. To má za následek ale možnou chybu v samotném měření a je nutné, aby byl pohyb plynulý a nepředstavoval žádný, nebo minimální zásah do možného zkreslení naměřených hodnot.

Proto pohybující se části stroje musí splňovat požadavky na realizaci pohybu v jednotlivých osách, jako jsou:

- přímočarost,
- vzájemná kolmost,
- stálost rozměrů,
- minimální vůle,
- minimální pasivní odpory.[1,2]

Z hlediska konstrukce jsou tyto požadavky plněny několika způsoby.

**Kluzné uložení** – využívá se na kovových plochách při měření malých rozměrů a vyšších třídách přesnosti. Nevýhodou je velký odpor, a tedy malé posuvové rychlosti. Další nevýhodou je potřeba neustálého promazávání. Výhodou je velká tuhost a fakt, že se kvalita vedení v průběhu používání zlepšuje, a tím i přesnost samotného měření.[1,2]

**Valivé uložení** – nejjednodušším řešením valivého uložení je realizace přes přesné kladky. Dokonalejším je pak přes valivá hnízda, při kterých se eliminuje vliv mikronerovností. Výhodou je nízký valivý odpor a odolnost proti opotřebení. Vyhovují i při velkém zatížení.[1,2]

**Aerostatické uložení** – pohyb je realizován bez tření na vzduchovém polštáři šířky 4 až 8  $\mu\text{m}$ . Výhodou je minimální odpor i při vyšších rychlostech posuvu. Nevzniká trhavý pohyb a je potlačen vliv nepřesnosti povrchu.[1,2]

Aby se ale pohyblivé části stroje mohly pohybovat, musejí mít nějaký typ pohonu. Typů pohonů je hned několik a jejich nasazení záleží na podmínkách použití. Jsou to:

**Ozubené hřebeny** – pro vyvolání přímočarého pohybu nejjednodušší a vhodné pro dlouhé dráhy pohybu. Hodí se pro mostové typy CMM strojů.[6]

**Řemenové převody** – součástí je řemen, dvě řemenice, pro snížení otáček a zvýšení krouticího momentu reduktor a servomotor. Předností je rychlý tichý chod. Nevýhodou je náchylnost na vyšší teploty, možnost prokluzu a opotřebení řemene. Nelze použít na skenovací operace.[6]

**Třecí převody** – součástí je hnací kolo, ploché nebo hranaté hnané tyče a přítlačné kolo. Výhodou je klidný tichý chod a tlumení rázu. Nevýhodou je však malý výkon a opotřebení.[6]

**Vodící šrouby** – častým typem vodících šroubů jsou kuličkové šrouby založené na principu převodu rotačního pohybu na přímočarý pomocí kuliček jako valivých elementů. Poskytují tuhost a přesnost, avšak mohou být hlučné a podléhají opotřebení.[6]

**Lineární pohony** – motory s přímým pohonem bez převodovky konající posuvný, nikoliv rotační pohyb. Bez mechanických vůlí. Výsledkem je vysoká přesnost polohování, omezená pouze přesností metody měřící polohu. Využívají se u CMM s mostovou konstrukcí.[6]

## 1.4 Odměrovací systémy CMM strojů

Odměrovací systém stroje je důležitou součástí, neboť umožňuje orientaci v souřadném systému stroje a dále v souřadném systému měřené součástky. Zprostředkovává přesné polohování mechanických částí stroje a zpětnou vazbu měřicímu softwaru. Do jisté míry ovlivňuje výslednou přesnost měření. Odměrovací systémy lze v základu dělit na přímé a nepřímé. Tedy zda se odměřuje přímo poloha pohybující se části stroje nebo poloha pohybového mechanismu dané části stroje. V tom případě se jedná o nepřímé odměřování. Dále lze dělit dle principu práce na analogové a digitální. Poté pak dle charakteru informací na přírůstkové (inkrementální) odměřování a absolutní odměřování. V neposlední řadě na principu odměřování, kde spadá indukční a laserinterferometrové.[2,6]

**Inkrementální odměřování** – řídicí systém počítá polohu ode pevného bodu (referenční polohy). Po zapnutí stroje je nutné stroj seřadit najetím do referenční polohy všech os, aby došlo k nastavení souřadného systému.[6]

**Absolutní odměřování** – poloha je poskytována po zapnutí stroje z enkodéru a může být vyvolána kdykoliv vyhodnocovací elektronikou.[2,6]

V souřadnicově měřících strojích se mohou objevit následující typy odměřovacích systémů:

- optické,
- rotační,
- magnetické,
- indukcosynové,
- laserinterferometrové.[6]

**Optické odměřovací systémy** – je to optický lineární snímač skládající se ze stupnice a opticko-elektrické čtecí hlavy. Jedna část je připevněna k posuvové části CMM. Vzájemný pohyb vyvolává informaci o posunutí.[6]

**Rotační enkodéry** – jsou inkrementální nebo absolutní. Je to elektromagnetický převodník převádějící rotační pohyb na sekvence elektrických digitálních impulsů. Inkrementální pracují tak, že výstupem je řada impulsů měnících se v závislosti na rotačním posunutí os. Což znamená, že dostaneme informaci pouze o pohybu. Kdežto u absolutních enkodérů dostáváme úhel natočení s použitím absolutního kódu, takže máme informaci o poloze i o pohybu.[6]

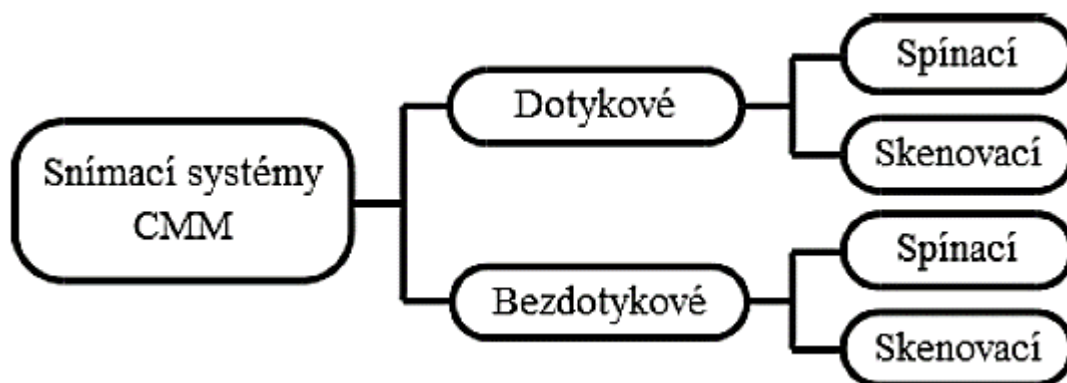
**Magnetické odměřovací systémy** – pracují na bázi dvou základních dílů. Dvoupólového magnetu a čipu s maticí Hallových sond. Sondy snímají změny magnetického toku při rotaci magnetu, což vyvolává Hallovo napětí. Toto napětí je zpracováno čipem do formátu výstupu. Výstup může být analogový, inkrementální nebo absolutní. Pro lineární odměřování se používají magnetické pásky a pro rotační odměřování magnetické prstence.[6]

**Indukcosynové odměřovací systémy** – skládají se z měřítka a pohyblivé části. Jezdec je vzdálený 0,1 mm od měřítka a jsou na něm naleptány dvě posunutá vinutí. Plošný spoj měřítka je napájen střídavým proudem. V jezdcu se při vzájemném posuvu jezdce a měřítka indukuje napětí, jehož amplituda se mění dle sinusové závislosti v jednom vinutí a kosinusové závislosti ve druhém vinutí. Zesílené signály změn amplitud jsou poté vyhodnocovány v převodnicích nebo indikacích polohy. Vyrábí se jako lineární nebo rotační.[6]

**Laserinterferometrové odměřovací systémy** – moc se u CMM strojů neobjevují. Pracují na principu interference světla a skládají se z paprsku, interferometru a dvou zrcadel. Laser je rozdělen polopropustným zrcadlem na dvě větve stejné fáze (referenční a měřicí). Odražený referenční paprsek jde k pevnému zrcadlu a odrazí se zpět. Projde k pohyblivému zrcadlu, kde se odrazí a dopadá zpět na polopropustné, kde se spojí s druhým paprskem a vyvolají interferenci. Na stínítku se objeví světlé a tmavé proužky (minima a maxima), které lze odečíst a pokud známe i vlnovou délku, pak lze vypočítat posun pohyblivého zrcadla. Stupnice dosahují přesnosti až  $0,01\ \mu\text{m}$ . V porovnání s jinými systémy jsou laserinterferometrové mnohem dražší.[6]

## 1.5 Kontaktní snímací systémy a měřicí dotyky

Kontaktní snímací systémy umožňují již přímý kontakt s měřeným obrobkem skrze měřicí (snímací) dotyky. Slouží k nasnímání bodů, které jsou za pomoci softwaru vyhodnocovány. Avšak kontaktní metody nejsou jediné, které se dají použít k nasnímání bodů. Existují také bezkontaktní systémy založené na principu laseru nebo kamery, ale těmi se zabývat nebudeme. Přehledné rozdělení je vyobrazeno na obr. 6.



Obr. 6 Rozdělení snímacích systémů[6]

Na obr. 6 vidíme, že se dotykové i bezdotykové dále rozdělují na spínací a skenovací metodu. Spínací metodě stačí zaznamenat dostatečný počet bodů měřené geometrie obrobku pro vyhodnocení geometrické odchylky. Skenovací metoda pracuje na trochu odlišném principu. Zde se skenuje celý tvar měřené geometrie a počet naskenovaných bodů je mnohonásobně vyšší. Skenovací metoda je pomalejší, ale dává jasnější představu o vyhodnocované geometrické odchylce. Nesmíme ale opomenout vliv velikosti měřicího dotyku, jestliže se jedná o kontaktní metodu.

Třetí specifickou pomyslnou skupinou snímacích systému, které nejsou ani kontaktní ani bezkontaktní, jsou systémy, které pracují na principu elektrické interakce s měřeným obrobkem skrze útlum harmonického kmitání přerušováním kontaktu s obrobkem, nebo

skrze viskozitu vzduchu mezi snímacím dotykem a měřeným obrobkem. Tato skupina je využívána pro měření velmi malých prvků.[6]

Snímací systémy jsou tedy několika typů a využívají různé druhy interakcí s obrobkem. Hlavní mechanismy snímacích systémů tedy jsou:

- dotykové – kontakt je zaznamenán, když síla překročí řízenou hodnotu,
- elektrické – odpor, indukance, kapacitance,
- optické – odraz světla,
- magnetické.[6]

Dnes se na poli moderních CMM strojů převážně využívají dotykové a optické snímací systémy.[6]

Z hlediska umístění na stroji je snímací systém CMM stroje spojený s pinolou a skládá se z několika částí:

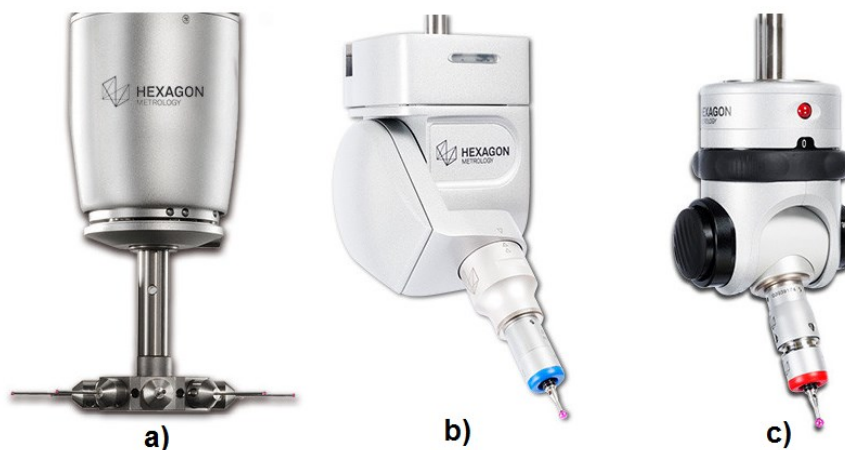
- snímací hlava,
- prodloužení snímací hlavy,
- systém na výměnu snímací hlavy,
- snímací dotyk,
- systém na výměnu snímacího dotyku,
- prodloužení snímacího dotyku.[2]

Hlava snímacího systému je velmi důležitou součástí. Existují dva typy snímacích hlavic. Pevné a indexovatelné. Indexovatelné se pak dají rozdělit na hlavice motorické a manuální. Rozdíl mezi nimi spočívá v tom, že indexovatelné mohou být natáčeny v prostoru ve všech osách a mohou být zajištěny v požadované poloze.[2]

**Pevné hlavice (obr. 7a)** – tyto hlavice se nedají natáčet, což znamená jisté omezení použitelnosti v prostoru. Na druhou stranu ale dosahují vyšší přesnosti než indexovatelné hlavice.[2]

**Motorické hlavice (obr. 7b)** – typ indexovatelné hlavice umožňující natáčení sondy v prostoru tak, aby samotné snímání bodů probíhalo v co nejlepším úhlu a bylo zajištěno co nejpresnější měření. Hlavice umožňují vyvolání polohy bez nutnosti rekvalifikace a tím šetří čas. Využívají se i servopohony, které dovolují neomezené úhlové natáčení a jsou ideální pro CMM s horizontálním ramenem.[2]

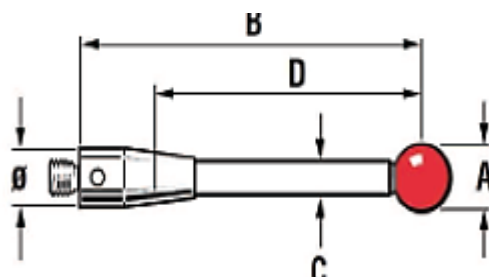
**Manuální hlavice (obr. 7c)** – jedná se o ručně nastavitelné hlavice umožňující flexibilní měření složitějších tvarů kontrolovatelných obrobků.[2]



Obr. 7 Snímací hlavice firmy Hexagon[7]

a) pevná hlavice, b) motorická hlavice, c) manuální hlavice

Poslední část snímacího systému kontaktní metody je snímací (měřicí) dotyk. Zprostředkovává kontakt mezi sondou a měřeným obrobkem a zajišťuje sepnutí mechanismu sondy. Signál vygenerovaný sepnutím mechanismu umožňuje zaznamenání souřadnice nasnímaného bodu. Výběr snímacího dotyku závisí na snímaném prvku. Nejdůležitější je tuhost dotyku a dokonalý tvar kuličky (obr. 8).[2]



A – průměr kuličky,

B – celková délka,

C – průměr dřívku,

D – efektivní činná délka (EWL).

Obr. 8 Rozměry dotyku[2]

Snímací dotyk se vybírá dle zásad:

- co nejkratší dotyk (pro nulový průhyb),
- co nejmenší počet prodlužovacích nástavců (každý spoj je zdrojem nepřesností),
- co největší průměr kuličky (u větší kuličky se volí větší průměr stopky dotyku a tím zvýšená tuhost dotyku).[2]

Snímací dotyky se vyrábějí z různých materiálů a každý materiál se nedá použít na všechny obrobky. Snímací dotyky se vyrábějí z rubínu, nitridu křemíku, oxidu zirkoničitého a diamantu.[2]

**Rubín (obr. 9a)** – nejpoužívanější u většiny měřících aplikací. Existují však dva případy, kdy se nedoporučuje rubín používat. Prvním u výkonných skenovacích aplikací hliníkových materiálů, kdy může docházet k usazování hliníku na kuličce. Druhým případem jsou skenovací aplikace u litinových povrchů, kdy může docházet k opotřebení rubínové kuličky o skenovaný materiál.[2]

**Nitrid křemíku (obr. 9b)** – má hodně společných vlastností s rubínem. Je tvrdý a odolný proti opotřebení. Při kontaktu s ocelovými povrchy vykazuje značnou míru opotřebení otěrem.[2]

**Oxid zirkoničitý (obr. 9c)** – pevný keramický materiál s tvrdostí a mírou opotřebení jako rubín. Je vhodný pro agresivní aplikace u litinových součástek.[2]

**Diamant (obr. 9d)** – je vhodný pro všechny měřící aplikace, a to včetně velkého zatížení při skenování hliníkových dílů. Překonává konvenční materiály a poskytuje nejpřesnější a nejekonomičtější měření. Je extrémně tvrdý a hladký povrch udržuje opotřebení na minimální hranici.[2]



Obr. 9 Materiály snímacích kuliček[2]

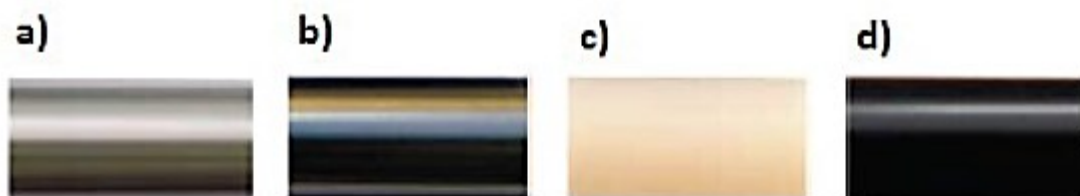
Důležitým aspektem snímacích dotyků je také stopka a materiál, ze kterého je vyrobena. Zde se používají materiály jako ocel, karbid wolframu, keramika a uhlíková vlákna.

**Ocel (obr. 10a)** – využívá se pro kuličky nebo hroty s průměrem 2 mm, nebo větším a do délky stopky 30 mm. Poskytují optimální poměr mezi tuhostí a hmotností stopky.[2]

**Karbid wolframu (obr. 10b)** – materiál poskytuje maximální tuhost při minimálním průměru stopky. Tyto podmínky jsou zajištěny pro kuličky průměru pod 1 mm a délky stopky do 50 mm.[2]

**Keramika (obr. 10c)** – při průměru kuličky nad 3 mm a délce stopky nad 30 mm poskytují shodnou tuhost jako ocel. Keramika je výhodná při nárazu snímacího dotyku, jelikož se roztříští a tím poskytuje dostatečnou ochranu sondy.[2]

**Uhlíková vlákna (obr. 10d)** – dobře tlumí vibrace a mají zanedbatelný koeficient tepelné roztažnosti. Proto jsou vhodným řešením pro stopky určené pro vysoce přesné sondy tenzometrického principu.[2]



Obr. 10 Materiály stopky[2]

## 1.6 Přesnost souřadnicových měřicích strojů

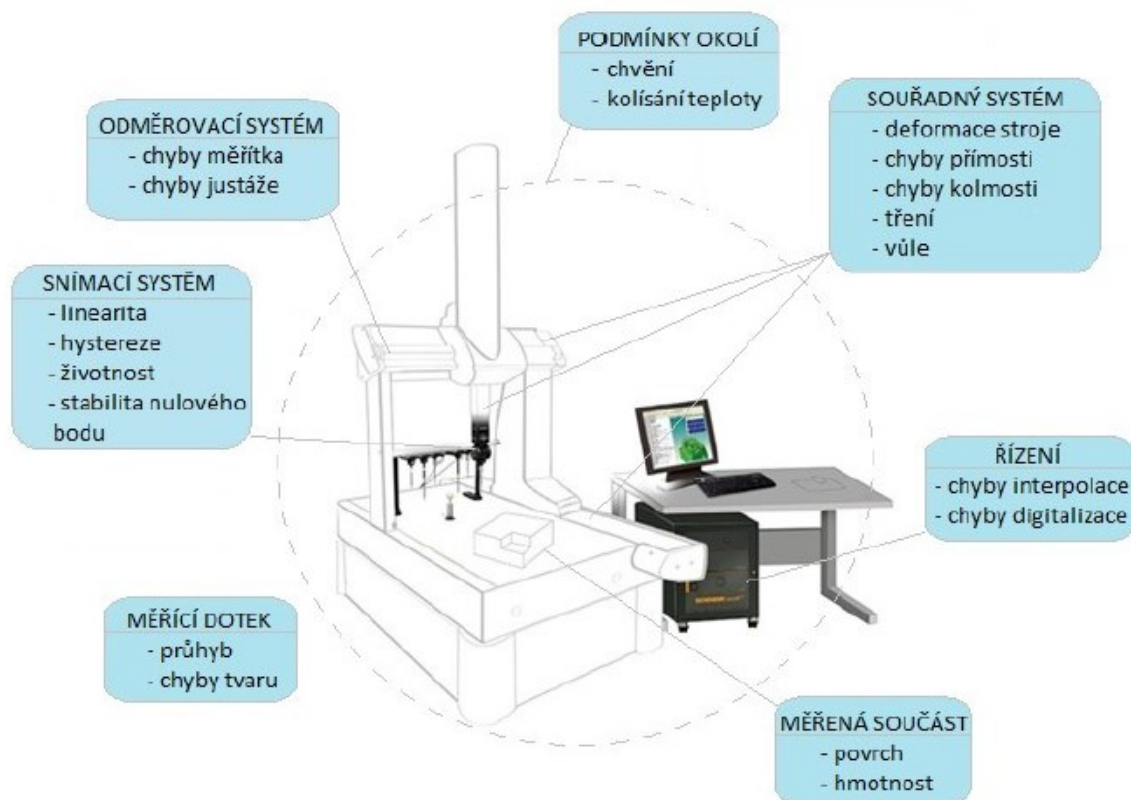
Přesnost souřadnicových měřicích strojů je všeobecně složitý pojem, do kterého zasahují spousty faktorů, jež mají zásadní vliv na konečný výsledek měření. Mezi tyto faktory lze zařadit vlivy měřicího přístroje, atmosférické vlivy okolí, vlastnosti měřeného obrobku, zvolená strategie měření a samozřejmě vliv obsluhujícího technika. Z praxe lze říci, že otázka přesnosti záleží na každém měřeném případě zvlášť. Nedá se přesně vyjádřit, ale jen jako pravděpodobnou chybu měření aritmetického průměru řady opakovaných měření.[2]

Výrobce tedy dbá na maximální přesnost všech dílčích součástí měřicího stroje, aby docílil maximální přesnosti stroje. Uživatelé zase zajímá celková přesnost, rychlé a snadné ověřování. Metody pro kontrolu přesností rozdělujeme na dva typy:

- analytické metody (po jednotlivých komponentech),
- globální metody (pomocí etalonu a zkušebních těles).[2]

Zdroje nepřesností, které se ve výsledku sčítají a ovlivňují samotný výsledek měření lze zobrazit na obr. 11.





Obr. 11 Zdroje nepřesností souřadnicových měřicích strojů[2]

## 1.7 Geometrické tolerování

Pod pojmem geometrické tolerování si můžeme představit fakt, že jednotlivé geometrické prvky vyrobené součásti nejsou takové, jaké jsou dány na výkresu. Vlivem mnoha faktorů, které působí na vyráběnou součást během výrobního procesu, tedy předepisujeme k jednotlivým prvkům tolerance v závislosti na požadované přesnosti výrobků. Tímto způsobem jsme schopni odlišit, zda se jedná o výrobky přijatelné anebo nepřijatelné. Ovlivňujícími vlastnostmi jsou tvar a jeho odchylky, nerovnosti a jejich rozestavení, trhliny a jiné poškození povrchu. Předepsané geometrické tolerance se mohou vztahovat:

- k jednomu prvku,
- ke dvěma nebo více prvkům.[8]

Pro pochopení problematiky geometrického tolerování je nutné si uvést základní termíny a definice.

**Prvek** – bod, čára, plocha, zkosená hrana, závit, středící důlek, zápich atd. Jednodušeji řečeno to jsou konstrukční prvky. Za jeden prvek pro potřeby geometrického tolerování považujeme i dvě rovnoběžné roviny, a to i roviny tečné k válci, kouli apod.[8]

**Profil** – průsečnice plochy s rovinou nebo plochou.[8]

**Jmenovitý tvar** – ideální geometrický tvar prvku určený výkresem nebo jiným technickým dokumentem.[8]

**Jmenovitý povrch (plocha)** – ideální plocha, jejíž tvar a rozměry odpovídají jmenovitým rozměrům a jmenovitému tvaru.[8]

**Jmenovitý (geometrický) profil** – profil získaný řezem jmenovitého povrchu rovinou.[8]

**Skutečný povrch (plocha)** – získaný výrobou.[8]

**Skutečný profil** – průsečnice skutečné plochy s rovinou.[8]

**Vztažný úsek** – čára nebo plocha, na něž se vztahuje příslušná geometrická tolerance.[8]

**Základní prvek** – skutečný prvek sloužící ke stanovení příslušné základny pro geometrické tolerance.[8]

**Základna** – teoreticky přesný geometrický prvek, k němuž se vztahuje geometrická tolerance tolerovaného prvku.[8]

**Soustava základen** – skupina samostatných základen, k nimž se vztahuje geometrická tolerance tolerovaného prvku.[8]

**Dílčí základna** – bod, úsečka nebo omezená plocha na základně, na nichž musí být zajištěn styk součástí se základnami kontrolního zařízení.[8]

Základní přehled geometrických tolerancí je uveden v tab. 1.

Tab. 1 Přehled geometrických tolerancí[5]


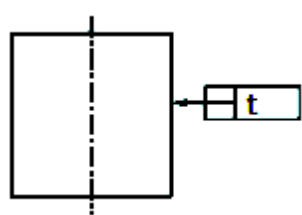
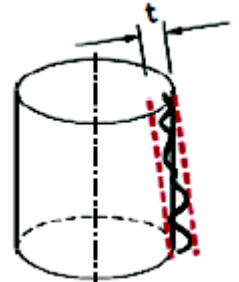
Geometrické tolerance		Značka
Tvaru	Přímosti	—
	Rovinnosti	
	Kruhovitosti	
	Válcovitosti	
	Tvaru profilu	

	Tvaru plochy	
Směru	Rovnoběžnosti	
	Kolmosti	
	Sklonu	
Polohy	Umístění	
	Soustřednosti a souososti	
	Souměrnosti	
Házení	Kruhového	
	Celkového	

V tab. 2 až tab. 6 je uveden výběr některých geometrických tolerancí s vysvětlením, co to geometrické tolerance jsou, jak se značí a názorný příklad.


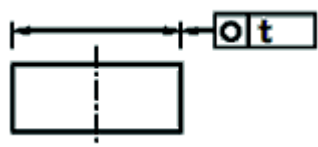
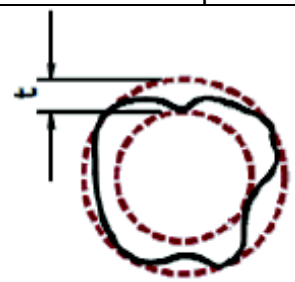
### Přímost

Tab. 2 Přímost[9]

Označení	Příklad	Toleranční pole
		


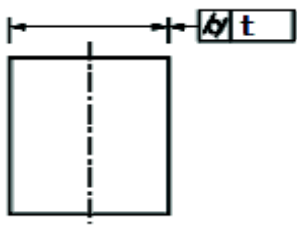
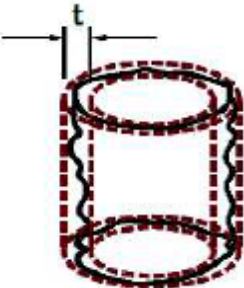
### Kruhovitost

Tab. 3 Kruhovitost[9]

Označení	Příklad	Toleranční pole
		


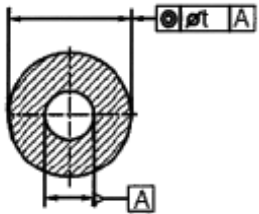
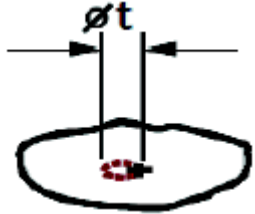
**Válcovitost**

Tab. 4 Válcovitost[9]

Označení	Příklad	Toleranční pole
		


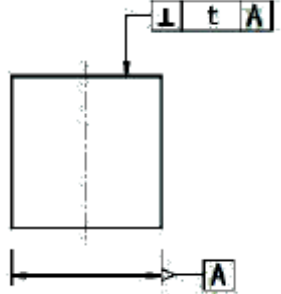
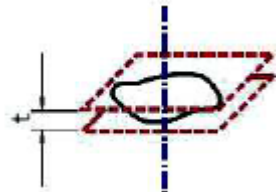

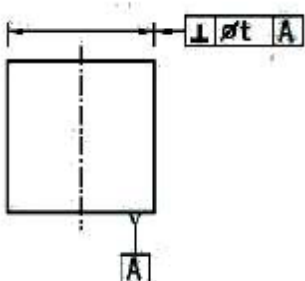
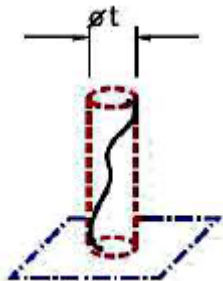
**Soustřednost**

Tab. 5 Soustřednost[9]

Označení	Příklad	Toleranční pole
		

**Kolmost**

Tab. 6 Kolmost plochy vůči ose a kolmost středící čáry vůči vztažené rovině[9]

Označení	Příklad	Toleranční pole
		
		

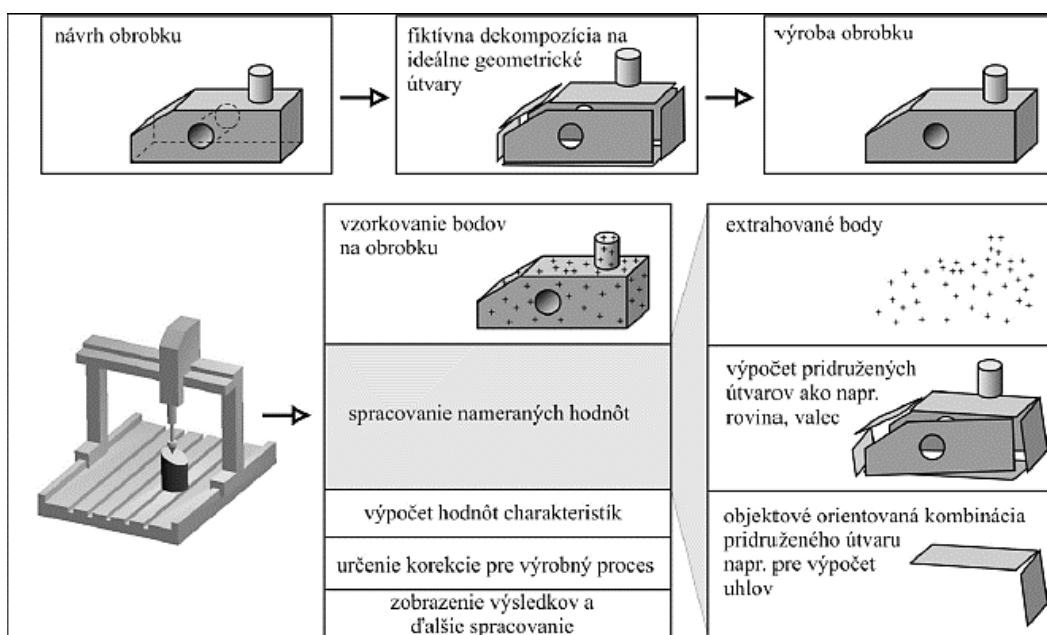
## 1.8 Princip a strategie měření

Samotný princip souřadnicového měření je vcelku jednoduchý a spočívá v nasnímání bodů a určení jejich polohy v pracovním prostoru stroje. Při zvolení správné strategie měření je možno nasnímat jednotlivé elementy měřeného obrobku, které v programu dávají celkovou představu o skutečném tvaru obrobku.[2]

Postup samotného měření lze shrnout do těchto bodů:

1. studie výkresové dokumentace,
2. určení souřadného systému (kartézský, polární),
3. rozložit obrobek na elementy,
4. zvolit vhodnou metodu základního vyrovnání obrobku (odebrat všechny stupně volnosti měřenému obrobku),
5. změřit vybrané elementy pro základní vyrovnání a aplikovat zvolené metody vyrovnání,
6. změřit ostatní elementy (na základě vztahů mezi nimi vyhodnotit geometrické odchylky tvaru a polohy, rozměry, atd.),
7. interpretace výsledků v měřicím protokolu.[2]

Tento zjednodušený princip je vyobrazen na obr. 12. Lze si povšimnout, že jednotlivé body na sebe navazují a lze je tedy brát zjednodušeně jako univerzální postup měření obrobku na CMM strojích.



Obr. 12 Princip souřadnicového měření[2]

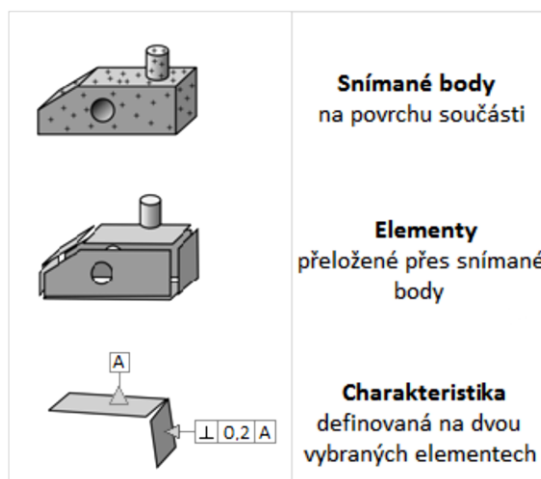
**Element** – jako element se označuje teoretický geometrický tvar, který je proložen přes snímané body. Tedy můžeme říci, že jednotlivé elementy měřeného obrobku jsou geometrické tvary, ze kterých se měřený obrobek skládá. Pokud máme nasnímaných více bodů, pak některé softwary umí proložit element body jako regresní prvek. Minimální počet bodů potřebný k definování elementu vidíme v tab. 7.[2]

Tab. 7 Minimum potřebných bodů pro definování elementu[6]

Element	Minimální počet bodů
Bod	1
Přímka	2
Rovina	3
Bod symetrie	2
Kružnice	3
Válec	5
Kužel	6
Koule	4
Torus	7
Rovina symetrie	4
Elipsa	5
Obdélník	5
Podélný otvor	5

Po nasnímání elementů vyhodnocujeme tzv. **charakteristiky elementů**.

**Charakteristika elementu (obr. 13)** - popisují jeden element (průměr, délka, odchylka přímosti, kruhovitosti, apod.) nebo definují vztah mezi jednotlivými elementy (vzdálenost, odchylka kolmosti, úhel, apod.). Některé elementy (např. kružnice) mají více charakteristik (průměr, odchylka kruhovitosti, souměrnosti, souososti, apod.). Pro více elementů je možno použít jednu charakteristiku (pro dvě roviny úhel, kolmost, apod.).[2]



Obr. 13 Definice elementů a charakteristik[2]

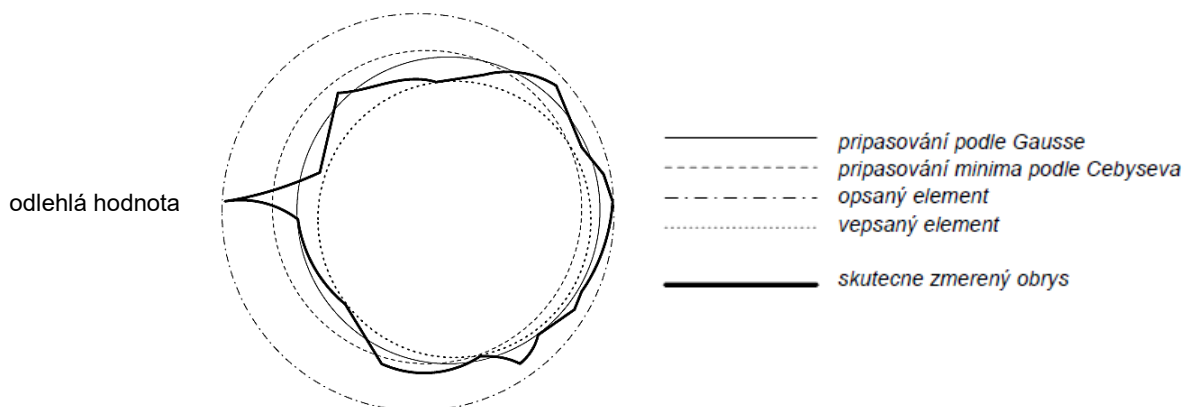
Užitečným nástrojem pro urychlení měření je automatická identifikace elementu. V ovládacím programu je možné využít tohoto nástroje a program sám rozezná, o jaký element se po nasnímání bodů jedná.[11]

Lze také využít již vytvořeného CAD modelu, který je možno zobrazit v programu. Výhodou je, že lze požadovaný element vybrat přímo z CAD modelu a poté již jen nasnímat body.[11]

Jednotlivé elementy jsou z nasnímaných bodů vypočteny. Vypočte se tzv. vyrovnávací element, který se do naměřených hodnot nejlépe hodí. Tento element (připisovaný) je základem pro vyhodnocení výsledků. Využívá se různých metod připisování a výsledné elementy se od sebe mohou mírně lišit. Z toho vyplývá také odchylka měřeného elementu od jmenovitého. Metody připisování mohou být[11]:

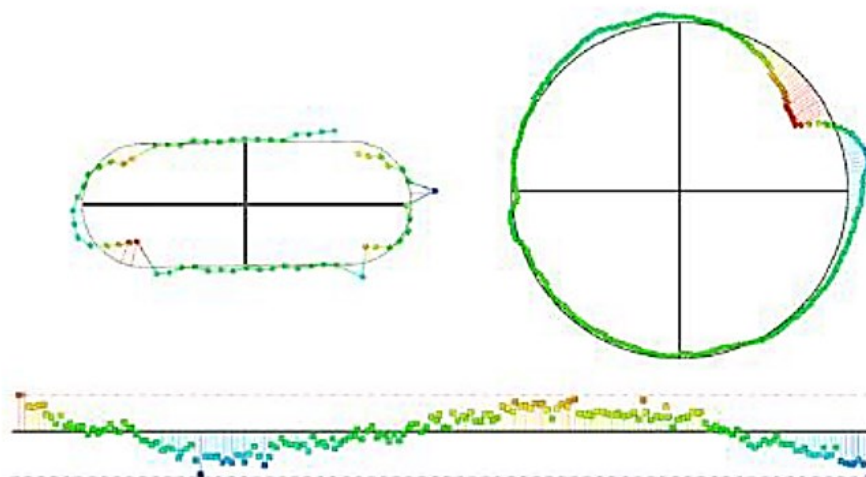
- Gauss,
- Chebychev (kritérium minima),
- výpočet jako min. opsaný resp. max. vepsaný element,
- výpočet jako tangenciální element (vnější/vnitřní).[11]

Na obr. 14 je patrné, jak je naměřený element oproti připisovanému odlišný. Záleží na vybrané metodě připisování.



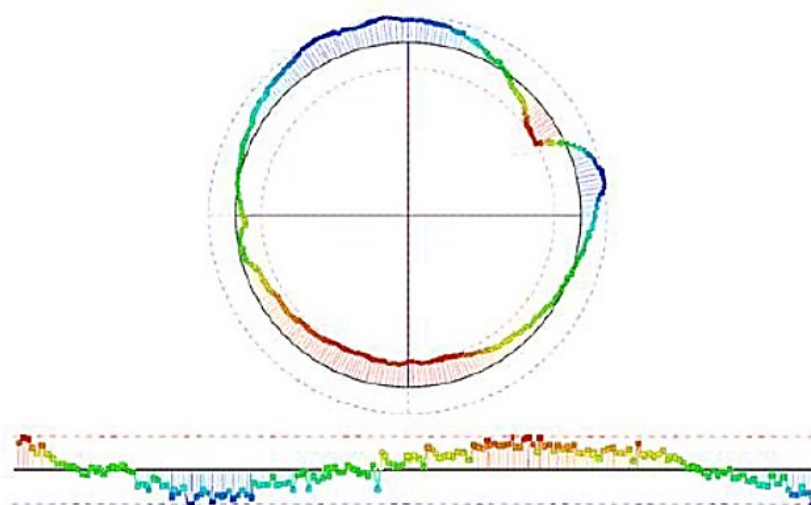
Obr. 14 Vliv metody připisování na skutečný naměřený element[11]

**Připisování podle Gausse (metoda nejmenších čtverců)** – metoda určuje optimálně připisovaný element. Vypočte se minimum ze součtu čtverců vzdáleností mezi vypočtenou ideální konturou a skutečně sejmoutou konturou. Tím je připisování podle Gausse velmi málo ovlivněno odlehlými hodnotami a vede k jednoznačnému výsledku. Pokud máme k dispozici málo bodů, je tato metoda standartní metodou vyhodnocení při kontrole rozměrů, úchylek tvaru a polohy. Princip metody lze vidět na obr. 15.[11]



Obr. 15 Metoda připasování podle Gausse[11]

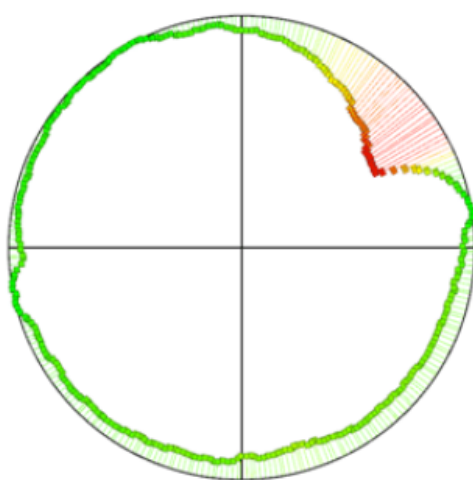
**Připasování podle Chebycheva** – metoda určuje geometrický element tak, abychom získali co nejmenší maximální odchylku mezi vypočtenou ideální konturou a skutečně sejmoutou konturou. Tato metoda je citlivá na odlehlé hodnoty a doporučuje se eliminace takových hodnot nebo jejich filtrace nízkopásmovým filtrem. Princip metody lze vidět na obr. 16.[11]



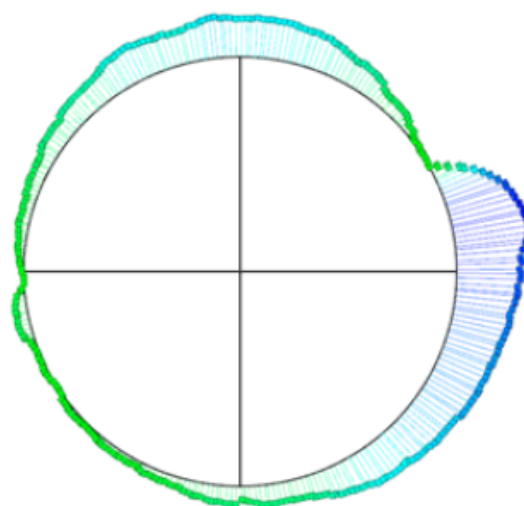
Obr. 16 Metoda připasování podle Chebycheva[11]

**Výpočet jako min. opsaný/max. vepsaný element** – minimálně opsaný element je tvořen tak, že žádný bod neleží mimo tento element, když to maximálně vepsaný element je tvořen tak, že žádný element neleží uvnitř tohoto elementu. Předpokladem pro tuto metodu je vysoký počet nasnímaných bodů. Doporučuje se eliminovat odlehlé hodnoty nebo filtrace nízkopásmovým filtrem, jelikož je element tvořen právě na základě těchto hodnot. Princip metody lze vidět na obr. 17. a obr. 18.[11]



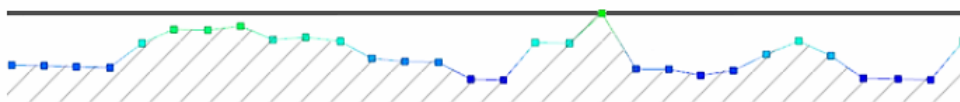


Obr. 17 Minimálně opsaný element[11]

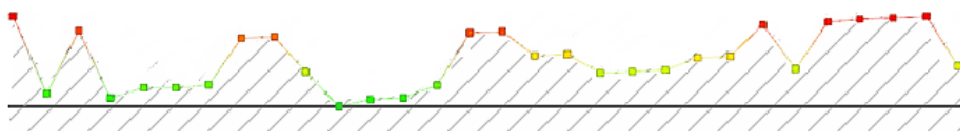


Obr. 18 Maximálně vepsaný element[11]

**Výpočet jako tangenciální element** – tangenciální element je největší možný element, mimo nějž neleží žádný snímaný bod elementu resp. nejmenší možný element, v němž neleží žádný snímaný bod elementu. Předpoklad pro tuto metodu je vysoký počet nasnímaných bodů. Doporučuje se eliminovat odlehlé hodnoty nebo filtrace nízkopásmovým filtrem, jelikož je tangenciální element tvořen právě na základě těchto hodnot. Příklady této metody jsou zobrazeny na obr. 19 a obr. 20.[11]



Obr. 19 Tangenciální největší možný element[11]



Obr. 20 Tangenciální nejmenší možný element[11]

Každá z těchto popsaných metod se nehodí na všechny měřené elementy. Přehled metod a elementů, na které je možno je použít je znázorněn v tab. 2 a 3.

Tab. 8 Použití metod připasování[11]

Element	Gauss	Čebyšev	Opsaný/Vepsaný	Tangenciální
Bod	x			
2D přímka	x	x		x
3D přímka	x	x		
Rovina	x	x		x
Kružnice	x	x	x	x

Tab. 9 Použití metod připasování[11]

Element	Gauss	Čebyšev	Opsaný/Vepsaný	Tangenciální
Koule	x	x	x	x
Válec	x	x	x	x
Kužel	x	x		
Elipsa	x			
Obdélník	x			
Torus	x			
Podélný otvor	x			

V mnoha případech je důležité pro dosažení optimálního výsledku měření ještě určit tzv. strategii měření. Pod tímto pojmem si můžeme představit další úlohy, které provádíme při měření elementů. Strategie měření vyplývá z konkrétní úlohy, která má být splněna. Nevztahuje se na plán měření, ale na každý příslušný element zvlášť.[11]

Při definici strategie měření elementu můžeme narazit na tyto úlohy:

- zvolit pomůcky (stop, mezipoloha, výměna snímače, bezpečnostní data, atd.),
- použít makra-technologie (režim Jednotlivé body),
- zvolit metodu generování dráhy,
- definovat rozsah vyhodnocení,
- editovat seznam bodů,
- upravit pojezdy,
- zkontrolovat a/nebo doplnit bezpečnostní data.[11]

## 1.9 Ustavení a souřadnicový systém

Souřadnicové systémy se využívají pro určení polohy výrobku na stroji a jejich vyrovnaní. K tomu se využívají různé postupy.

- Metoda 3-2-1 (primární směr, sekundární směr, počátek),
- Metoda RPS (reference point systém),
- Metoda Bestfit.[11]

Jsou rozlišovány dva typy souřadnicových systémů. Výrobku a palety. Souřadnicový systém výrobku (SSV) je uložený v databázi s aktuálním měřením a lze ho použít na daný výrobek. Souřadnicový systém palety (SSP) je uložený v systémové databázi a lze ho využít na všechny výrobky daného typu.[11]

**Metoda 3-2-1** – nejdříve se určuje primární směr, který určuje prostorovou pozici výrobku nebo palety. Nejčastěji se využívá přímka. Poté sekundární směr, který určuje otočení výrobku nebo palety okolo primárního směru. Výpočet sekundárního směru závisí na typu prvku.

- přímka, válec, kužel, bod na hraně – použít směrový vektor prvku.
- bod, koule – použita spojnice mezi začátkem aktuálního souřadného systému a polohy prvku.
- kružnice, obdélník, drážka – když je směrový vektor prvku rovnoběžný s primárním směrem, tak se určí spojnice, která vznikne spojením začátku aktuálního souřadnicového systému a polohou prvku. Nebo se použije směrový vektor prvku.
- Rovina – jestliže je sekundární směr určený hned po primárním, bude jeho směr určený jako průsečnice mezi rovinou aktuálního souřadnicového systému a daným prvkem. Nebo se použije směrový vektor prvku.

Poslední se určuje začátek, který určuje přesnou polohu výrobku nebo palety.[6,11]

**Metoda RPS** – tato metoda se využívá, když výrobek neumožňuje použít žádný prvek pro přímé vyrovnaní. Metoda má dvě varianty. RPS 321 a RPS volný tvar. Metoda RPS 321 vychází z bodů se souřadnicemi určenými minimálně třemi a maximálně šesti elementy. Určuje se, které souřadnice elementu jsou pevné a které volné. Metoda RPS volný tvar je vhodná pro součásti s volným tvarem. Naměřené body jsou promítnuty na rovinu, která je určena bodem a normálou. Využívá se iterace, neboli opakovatelné měření, a tím se zpřesňují výsledky a umístění bodů na tělese.[6,11]

**Metoda Bestfit** – funkce vypočítá optimalizovaný souřadnicový systém použitím trojdimenzionálního bestfitu, takže odchylky mezi skutečnou a cílovou geometrií jsou minimální. Skutečná změřená geometrie se posouvá a natáčí, až poloha nebo naměřené body nedosáhnou minimální vzdálenosti k cílové geometrii. Cílová geometrie odpovídá cílovým hodnotám, které jsou vypočteny z nominálních hodnot a tolerancí. To znamená, že cílové hodnoty představují středy tolerancí. Pokud nejsou žádné tolerance k dispozici, použijí se nominální hodnoty.[6,11]

## 2 Základny a soustavy základen

Základny jsou důležité při vyhodnocování geometrických tolerancí, které se vztahují ke dvěma či více prvkům. Do této skupiny tedy patří tolerance předepisující toleranční pole, v němž musí tolerovaný prvek vzhledem k základnímu prvku nebo k více základním prvkům ležet. Tolerovaný prvek se nahrazuje obalovým prvkem a základní prvek se může nahradit geometricky přesnějším náhradním prvkem. Geometricky přesnější náhradní prvek může být prvek obalový nebo prvek dotykový. Jestliže není vyznačena vztažná délka nebo plocha, vztahuje se předepsaná tolerance na celou délku prvku nebo na celou plochu.[8]

Tedy při vyhodnocování tolerance dvou nebo více prvků se musí předepsat, ke kterému prvku se uvažovaná tolerance vztahuje. Obecně se takový prvek, k němuž se vztahuje tolerance jiného prvku, nazývá **základna**. Základna může být tvořena společnou osou dvou a více **základních prvků** a v mnoha případech se tolerance předepisuje vzhledem k několika základnám, které tvoří **soustavu základen**. [8]

### 2.1 Termíny a definice

Norma ČSN EN ISO 5459 popisuje základní termíny a definice, jež je dobré alespoň zběžně znát pro pochopení problematiky základen a jejich úlohy při hodnocení geometrických tolerancí mezi dvěma a více prvky. S některými z těchto pojmů se lze setkat již dříve a jsou popsány v kapitole 1.6 Geometrické tolerování.

**Situační prvek** – bod, přímka, rovina, šroubovice použité pro orientaci prvků.[4]

**Základní prvek** – skutečný integrální prvek použitý pro umístění základny.[4]

**Přiřazený prvek** – ideální prvek přiřazený k základnímu prvku specifickým kritériem.[4]

**Základna** – stanovena plochou, přímkou, bodem nebo jejich kombinací.[4]

**Primární základna** – základna neomezená jinými základnami.[4]

**Sekundární základna** – základna ovlivněna omezením orientace od primární základny.[4]

**Terciální základna** – základna ovlivněna primární i sekundární základnou.[4]

**Jednotlivá základna** – základna ustavená k jednomu prvku.[4]

**Společná základna** – základna ustavená ze dvou nebo více společně určených základních prvků.[4]

**Soustava základny** – dva a více situačních prvků ustavených ve specifickém uspořádání od dvou a více základních prvků.[4]

**Cílená základna** – část základního prvku, kterou může být bod, část čáry nebo plochy.[4]

**Pohyblivá cílená základna** – cílená základna s řízeným pohybem.[4]

**Seskupení povrchů** – dva a více povrchů uvažovaných jako jeden.[4]

**Rozměrový prvek** – geometrický tvar stanovený délkovým nebo úhlovým rozměrem.[4]

**Integrální prvek** – povrch nebo čára na povrchu.[4]

**Kontaktní prvek** – ideální prvek jakéhokoliv typu, liší se od jmenovitého prvku nebo uvažovaného prvku a je přiřazen k odpovídajícímu základnímu prvku.[4]

## 2.2 Základny

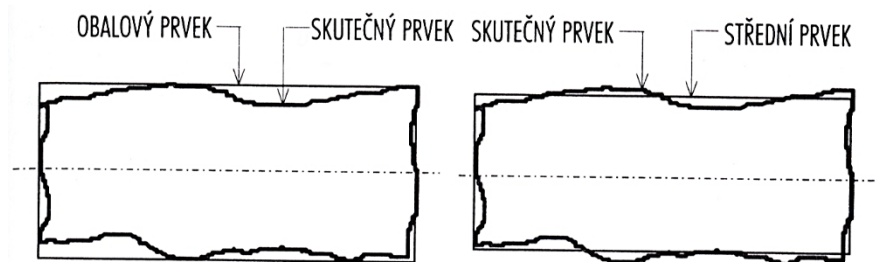
Základny mohou být vnímány jako prostředky k uzavírání stupňů volnosti tolerančního intervalu. Počet uzavřených stupňů volnosti tolerančního intervalu závisí na jmenovitém tvaru prvků využitých k ustavení základny nebo soustavy základen. V základním nastavení základna uzavírá všechny stupně volnosti, které je možné uzavřít vzhledem k jeho tvaru a které:

- jsou požadovány geometrickou charakteristikou, indikovanou v orámování tolerance,
- a dosud nebyly uzavřeny předchozí základnou (základnami) v soustavě základny.[4]

Základna se stanovuje ze skutečného prvku, k němuž se sestrojí náhradní prvek, který může být, např. válec, rovina apod. Náhradní prvek se stanoví:

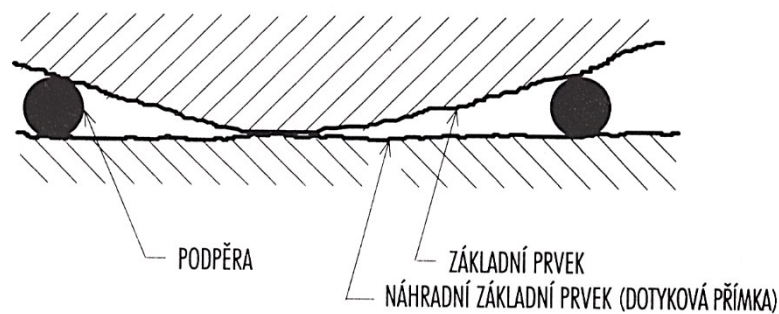
- jako obalový prvek k prvku skutečnému (obr. 21),

- jako střední prvek metodou nejmenších čtverců profilu povrchu skutečného prvku (obr. 22),
- jako dotykový prvek (obr. 23).[8]



Obr. 21 Obalový prvek[8]

Obr. 22 Střední prvek[8]



Obr. 23 Dotykový prvek[8]

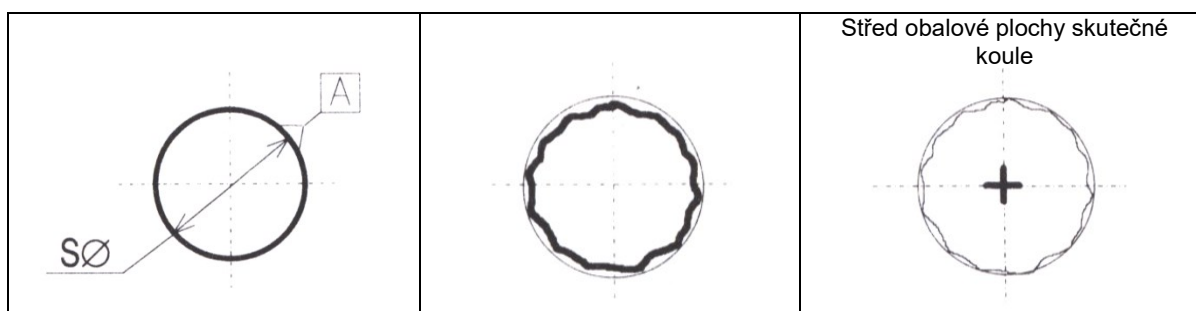
Jako základna se považuje přímo náhradní prvek, nebo jeho osa, popřípadě rovina souměrnosti apod. Základnu je definována:

- tvarem, který je předepsaný jako ideální geometrický tvar na výkresu,
- směrem, který je určen směrem náhradního prvku,
- umístěním, definovaným pro:
  - rovinu procházející extrémním bodem základního prvku vně materiálu,
  - osu válce, která je osou náhradního válce,
  - osu kužele, která je osou náhradního kužele,
  - střed koule, který je průsečíkem os náhradní koule,
  - přímkou extrémním bodem základního prvku vně materiálu,
  - střed kružnice středem náhradní kružnice.[8]

Základny jsou označovány trojúhelníkem umístěným na základní prvek písmenem velké abecedy (velikost písma - 3,5 mm), který se umísťuje do čtvercového rámečku (5x5 mm), který je spojen úsečkou k vrcholu trojúhelníku. Tento trojúhelník může být vyplněný nebo prázdný. Obojí je správně a znamená to samé.[8]

Tab. 10 Přehled označení základních prvků a základen[8]

Označení na výkresu	Základní prvek	Základna
		Obalová n. dotyková přímka/rovina 
		Rovina souměrnosti 
		Osa úhlu, střední rovina úhlu 
		Površka (obalová přímka skutečného podélného profilu), náhradní (obalová) válcová plocha 
		Osa nejmenšího opsaného válce (pro díru osa největšího vepsaného válce) 
		Osa nejmenšího opsaného kužele (pro kuželovou díru osa největšího vepsaného kužele) 
		Střed obalové kružnice skutečného profilu 



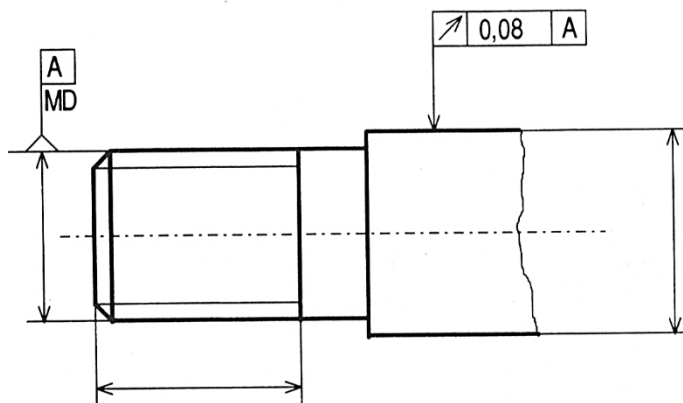
Kromě základního značení znázorněného v tab. 10 lze jako základnu předepsat prvek, který je společný pro dvě a více geometrických těles. Nejčastějším příkladem může být společná osa dvou čepů nebo děr, nebo také společná osa dvou středících důlků. Nejčastější případy jsou zobrazeny v tab. 11.[8]

Tab. 11 Přehled označení základních prvků a společných základů[8]

Označení na výkresu	Základní prvek	Základna
		Společná obalová rovina/přímka 
		Společná osa obalových válců dvou základních prvků E - F 
		Společná osa obalových kuželů dvou základních prvků E - F 
		Spojnice středů obalových kružnic skutečných profilů E - F 
		Spojnice středů obalových ploch skutečných koulí E - F 



Zvláštní pravidla pro předepisování základen můžeme najít u závitů. Dosud není zřejmé, ke kterému průměru se základna předepisuje, nebo zda se nevztahuje na boky závitů. V těchto případech se k označení přidávají písmena popisující, o který z průměrů se jedná. Například MD (Major Diameter -> z anglického jazyka -> velký průměr). Tento příklad můžeme vidět na obr. 24.[8]



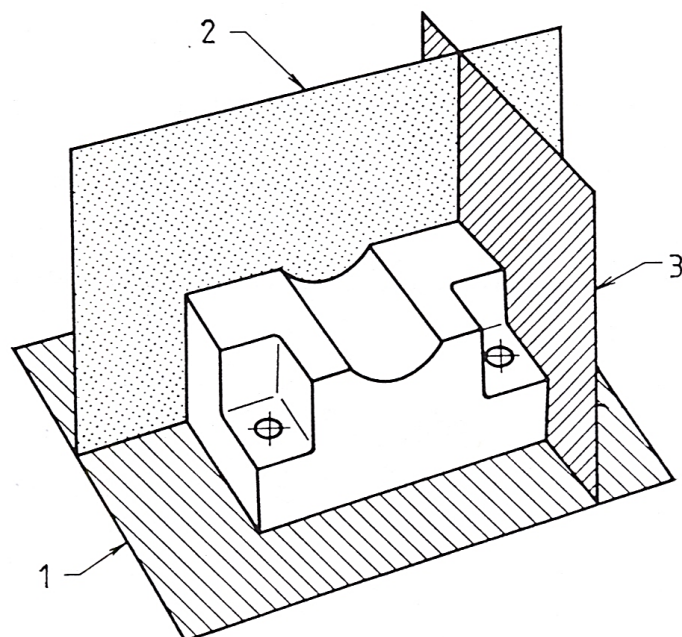
Obr. 24 Základnou je osa válce opsaného velkému průměru závitů d.[8]

V praxi, pokud je to možné, se jako základny používají základny měřicích zařízení. Sjednocením základního prvku (případně náhradního základního prvku) součásti a základny měřidla dostaneme polohu a orientaci měřené součásti. Vyrovnáním měřené součásti k měřicímu zařízení vyloučíme vliv úchylek tvaru základního prvku součásti. Obvykle se využívá náhradní základní prvek. Podmínka náhradního základního prvku je splněna, jestliže se tvar a směr základen měřicího zařízení rovná tvaru a směru obalových prvků. Neshoduje-li se směr základen měřicího zařízení se směrem ideálních obalových ploch základních prvků, užívají se náhradní základní prvky.[8]

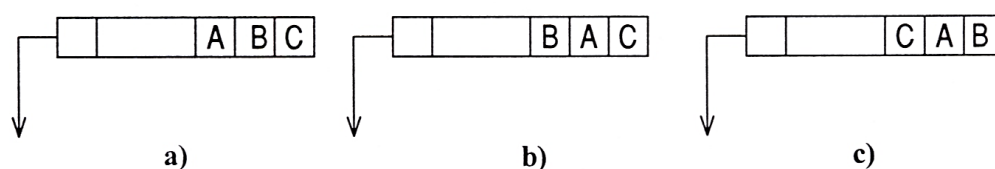
## 2.3 Soustavy základen

Soustavu základen tvoří dva či více základních prvků, které obvykle tvoří soustavu základen z tří rovin, které jsou na sebe kolmé (obr. 25). Pořadí prvků, ze kterých se soustava skládá, je důležité a jejich dodržování je naprosto zásadní. Pořadí prvků v soustavě základen zásadně ovlivňuje vyhodnocování geometrických úchylek, jelikož se součást svými plochami přikládá postupně k primární, sekundární a terciální základně. Na obr. 26 je znázorněno značení soustavy základen a jejich pořadí.[8]

Je potřeba dát pozor na postupné odnímání stupňů volnosti. Primární základna odebírá tři stupně volnosti, sekundární dva stupně volnosti a terciální jeden stupeň volnosti.[8]



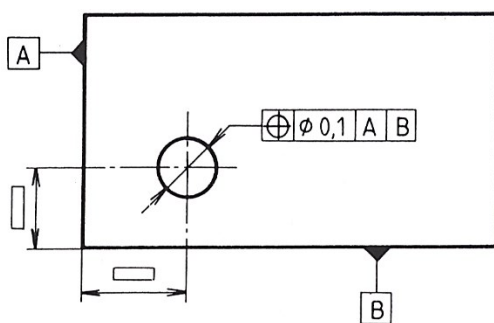
Obr. 25 Soustava základen[8]



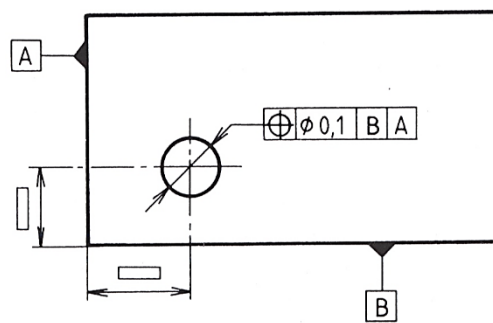
Obr. 26 Značení soustavy základen a jejich pořadí[8]

- a) pořadí základen: A – primární, B – sekundární, C – terciální,
- b) pořadí základen: A – sekundární, B – primární, C – terciální,
- c) pořadí základen: A – sekundární, B – terciální, C – primární.

Názorný příklad vlivu volby pořadí základen v soustavě základen představuje obr. 27/28. Zde je zobrazeno umístění díry v součásti. Soustavu základen tvoří základna A a základna B, které jsou na sebe kolmé. Na obr. 27 je základna A primární a základna B sekundární, když to na obr. 28 je základna A sekundární a základna B primární.

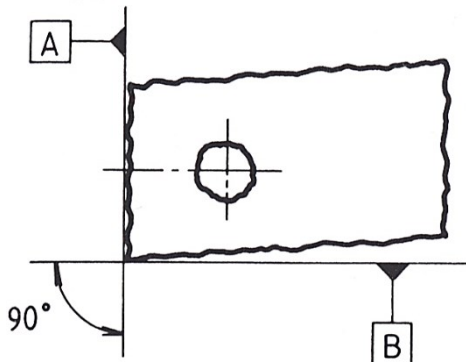


Obr. 27 Primární A, sekundární B[8]

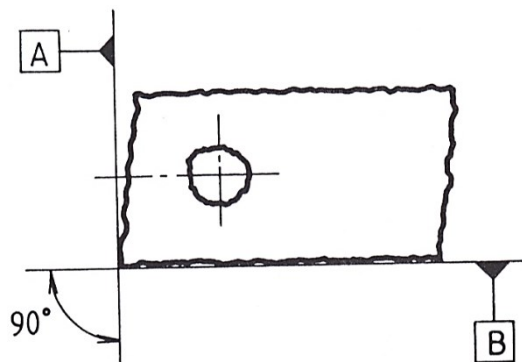


Obr. 28 Primární B, sekundární A[8]

Po srovnání výkresu součásti (obr. 27/28) se skutečným tvarem součásti (obr. 29/30) si lze povšimnout, že volba základny opravdu dramaticky ovlivňuje výsledné vyhodnocení geometrické tolerance součásti a že umístění díry je jiné při primární základně A, a při primární základně B.

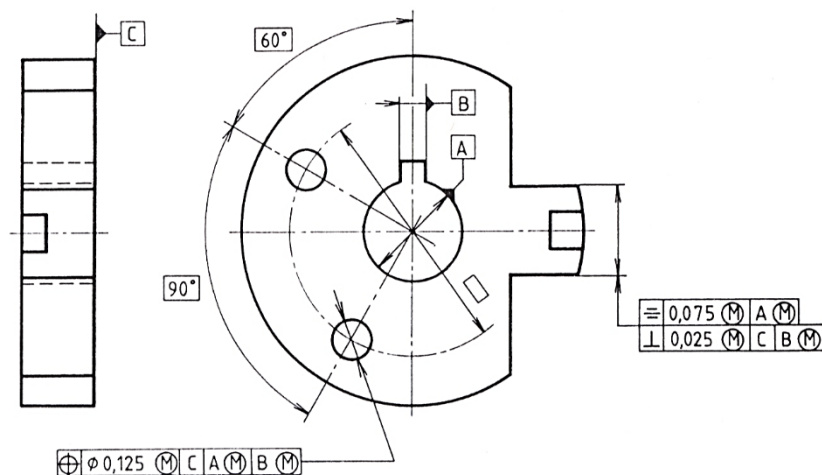


Obr. 29 Skutečný tvar - primární A, sekundární B[8]



Obr. 30 Skutečný tvar - primární B, sekundární A[8]

Soustava základen nemusí být jen na sebe kolmé roviny, ale může se také jako základna v soustavě objevit i jiný prvek (osa válcové plochy, střed díry, rovina souměrnosti drážky pro pero, apod.) Takový příklad je zobrazen na obr. 31.



Obr. 31 Soustava základen na součásti složená z různých základen[8]

Základna A se též při praktickém vyhodnocování úchylek může nazývat *ustavovací*. Ta se sjednotí se základnou měřicího stroje tak, aby poloha základního prvku odpovídala definici obalového prvku. Sekundární základna, nazývaná *směrovací*, se sjednotí se základnou měřicího zařízení ve směrech, které dovolují zbývající stupně volnosti po ustavení k primární základně. A terciální základna (*opěrná*) se sjednotí tak, aby odebírala poslední stupeň volnosti, který zbývá po ustavení součásti k primární i sekundární základně.[8]

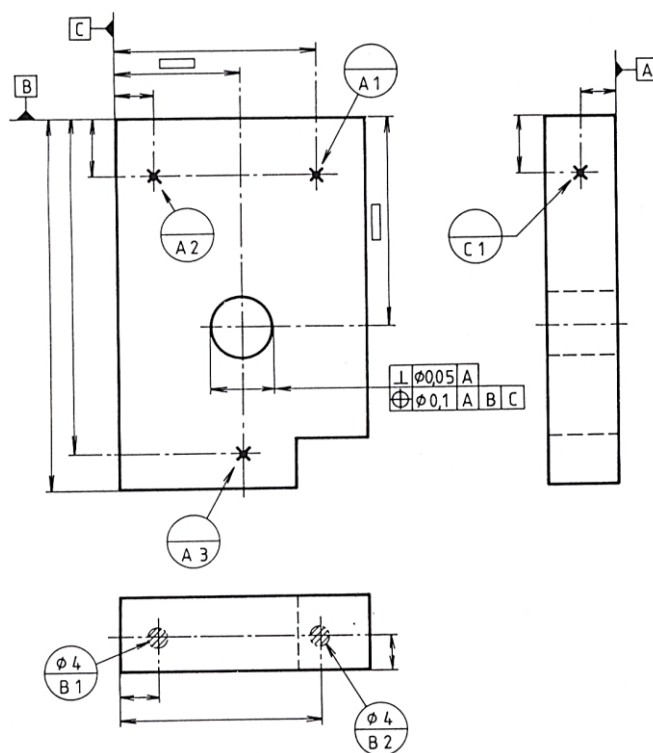
## 2.4 Dílčí základny

V případě, že je součást tvarově složitá a realizace předepsané základny není jednoznačná, používají se tzv. dílčí základny. Jako dílčí základny lze použít několik bodů, které mohou být kruhového nebo čtvercového tvaru. Počet dílčích základen je dán počtem bodů, které jsou potřeba pro definování prvku, který slouží jako základna. Pokud je základnou rovina, nahradí se třemi body nebo přímkou a bodem.[8]

Jestliže se jedná o soustavu základen, pak se primární rovina nahradí třemi body (nebo rovinou a bodem), sekundární rovina se nahradí dvěma body nebo přímkou a terciální rovina se nahradí pouze bodem. Toto postupné nahrazování odpovídá postupnému odnímání stupňů volnosti.[4,8]

Je-li dílčí základnou bod, kreslí se tlustým křížkem. Úsečka se kreslí dvěma krajními křížky spojenými tenkou souvislou čarou. Plocha se vyznačuje tenkou čerchovanou čarou se dvěma tečkami a vyšrafuje se.[4,8]

Dílčí základny se označují písmenem základního prvku, ke kterému náleží, a číslicí označují číslo dílčí základny. To je umístěno v dolní polovině kroužku. V té horní polovině jsou zapsány rozměry, je-li ploška kruhová či čtvercová. V normě ČSN EN ISO 5459 nalezneme příklad konkrétního předpisu dílčích základen v soustavě základen (obr. 32).[4,8]



Obr. 32 Značení dílčích základen podle normy ISO 5459[4]

### 3 Hodnocení metod měření

Zvolení vhodné metody měření je důležité, jelikož ovlivňuje výsledné hodnocení geometrických tolerancí měřené součástky. Pro co nejreálnější výsledek měření se musí nasnímat povrch měřené součásti co nejdokonaleji, aby poskytoval jasnou představu o tvaru měřeného objektu.

Výběr metody měření však závisí na mnoha faktorech, mezi které lze zařadit velikost a tvar měřeného objektu, velikost zkoumané tolerance, dostupnost místa měření, způsob výstupu a zpracování dat apod.

Měřicí metody lze rozdělit na dvě skupiny:

- spojitě metody,
- nespojitě (diskrétní) metody.

#### 3.1 Spojitá metoda

Charakteristickou vlastností spojitě metody je neustálý kontakt snímacího dotyku s měřeným objektem po celou dobu měření. Druhou charakteristickou vlastností lze nazvat fakt, že oproti nespojitě metodě je počet nasnímaných bodů mnohonásobně vyšší a jsou snímány v kratším intervalu, což nám dává mnohem jasnější představu o skutečném tvaru snímaného prvku měřené součásti. Spojitě metody se dají rozdělit na:

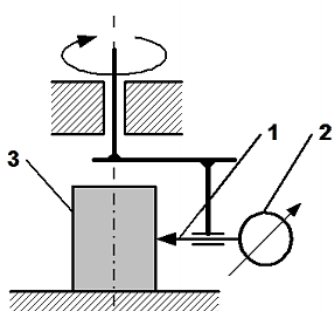
- absolutní metoda,
- relativní metody,
  - dvoubodová metoda
  - tříbodová symetrická
  - tříbodová nesymetrická
- skenovací metoda.[12]

**Absolutní metoda** – je metoda využívaná výhradně v laboratorních prostorech s metrologickým zaměřením. Prováděna na speciálních strojích k tomu určených. Tyto stroje mohou být:

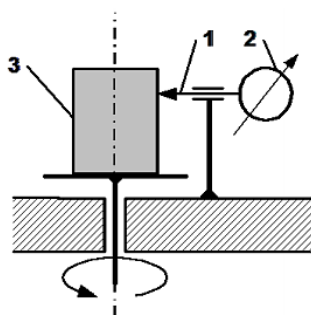
- **S otočným vřetenem (obr. 33)** – na tomto stroji je měřená součástka upevněna na stole, kolem kterého se otáčí otočné vřeteno se snímací hlavou.

Přesnost tohoto vřeten je často i lepší než  $0,1 \mu\text{m}$ . Je naprosto nezbytné, aby byla měřená součástka vycentrována s osou stolu nebo s osou rotace vřeten, aby nedošlo k chybám, které by se dostaly do výsledků měření, a také aby nedošlo k házení.[12]

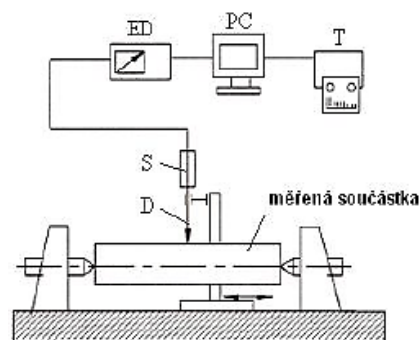
- **S otočným stolem (obr. 34)** – měření na tomto stroji probíhá skoro stejně jako na stroji s otočným vřetenem. Taktéž je nutné součástku dobře upevnit na stole a co nejlépe vycentrovat. Rozdíl je tady ten, že otáčivým prvkem je stůl se součástkou a snímací hlava je uchycena na pevno.[12]
- **S rotací součástky mezi hroty (obr. 35)** – způsob měření je zde velmi podobný jako na stroji s otočným stolem, avšak měřená součást je umístěna mezi dvěma hroty a otáčí se. Opět není nutno zajistit dokonalé vycentrování součásti. Snímací hlava s dotykem je umístěna k měřené součásti v radiálním směru.[10]



Obr. 33 S otočným vřetenem[12]



Obr. 34 S otočným stolem[12]



Obr. 35 S rotací mezi dvěma hroty[10]

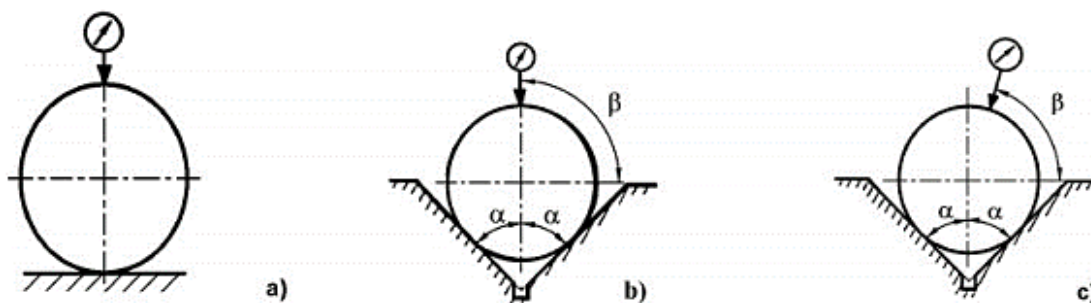
**Relativní metody** – hlavní rozdíl v principu této metody oproti principu absolutní metody je takový, že se zaznamenává pouze odchylka měřené veličiny od nastavené referenční hodnoty. Měření je časově nenáročné s výhodou menších nejistot výsledků.[12]

Měřená součástka se upne do měřicí hlavy stroje a měřicí stroj se uvede do rotačního pohybu s rychlostí 200 – 500 ot/min. Vznikající kmity odchylek se přenášejí elektrodynamickým snímačem procházejícím přes elektrický obvod a zaznamenaná střední hodnota odchylek je vyobrazena na displeji. Výhodou je možnost nasazení zařízení pro hromadnou kontrolu díky rychlosti měření.[12]

- **Dvoubodová metoda (obr. 36a)** – je metoda využívána v praxi s univerzálními měřidly a může se použít i na měření nepravidelných tvarů

s podmínkou sudého počtu stran. K výpočtu skutečné odchylky se stanoví koeficient  $K_n = 2$  a platí, že  $2\alpha = \pi$ ,  $\beta = \pi/2$ ,  $\alpha = \beta$ . [12]

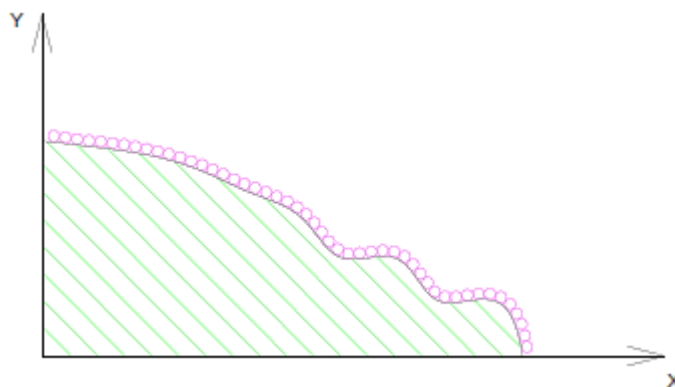
- **Tříbodová metoda symetrická (obr. 36b)** – vhodná pro měření vnitřních i vnějších profilů a lichoběžníkový počet nepravidelnosti. Lze použít i pro případ obrácené tříbodové symetrické metody, kdy se měřený objekt při měření nehýbe, ale otáčí se pouze měřicí stroj. Konstantní součinitel  $K_n = (0 \leq K_n \leq 2,73)$ . Realizovatelná jako přímá  $\beta = \pi/2$  nebo i jako obrácená  $\beta = -\pi/2$ . Používáme úhly  $\alpha$ :  $30^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $60^\circ$ . [12]
- **Tříbodová metoda nesymetrická (obr. 36c)** – podstata spočívá ve sloučení výhod dvoubodové metody a tříbodové symetrické metody. [12]



Obr. 36 Relativní metody [12]

a) dvoubodová metoda, b) tříbodová symetrická, c) tříbodová nesymetrická

**Skenovací metoda (obr. 37)** – plynulá spojitá měřicí metoda s vysokou hustotou bodů a minimálním odskokem snímacího dotyku. Skenování měřené součásti probíhá jako opisování trajektorie již předsnímaného tělesa. Vysokou hustotou bodů, kdy jednotlivé body jsou od sebe vzdálené i méně než 0,1 mm, získáváme představu o skutečném tvaru snímaného objektu. Měření se provádí na strojích CMM s podporou měřicí hlavy pro skenování. [12]

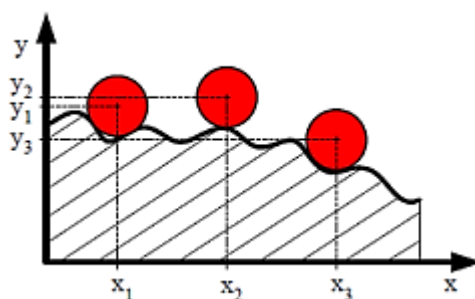


Obr. 37 Skenovací metoda [10]

### 3.2 Nespojité (diskrétní) metoda

Nespojitá (diskrétní) metoda se principiálně naprosto odlišuje od spojité metody, a to především v počtu nasnímaných bodů. Počet nasnímaných bodů závisí především na snímaném elementu a potřebném počtu bodů pro jeho definování. Tudíž je počet bodů mnohonásobně menší než u spojité metody.

Na CMM strojích se u snímaných bodů určuje jejich poloha v souřadnicovém systému stroje, popřípadě souřadnicovém systému výrobku. Těmito body tedy prokládáme měřený element. Protože element je teoretický geometrický tvar, nezískáváme představu o skutečném tvaru snímaného výrobku. Pouze si tento tvar přibližujeme. Princip metody lze vidět na obr. 38.



Obr. 38 Body nasnímané nespojitou metodou[5,10,12]

### 3.3 Porovnání spojité a nespojité metody

Obě metody mají svoje výhody a nevýhody a hodí se na různé případy měření. Je potřeba zvážit, kterou metodu použít. Záleží na typu stroje, typu měřeného výrobku, typu samotného měření, typu geometrických tolerancí apod. Tady musí přijít v potaz zkušenosti obsluhujícího technika.

Spojité metoda je výhodnější, když je potřeba mít přesnou představu o tvaru výrobku. Ale je nutno počítat s tím, že samotné měření může být časově náročné. Zvláště když uvážíme, že počet snímaných bodů spojité metody může být i několik tisíc.

Nespojitá metoda představuje rychlé měření jednotlivých elementů výrobku, avšak neposkytuje představu o skutečném tvaru a povrchu výrobku.



## 4 Experimentální část

Experimentální část této práce je věnována ukázce vlivu volby základny při hodnocení geometrických tolerancí a také tomu, zda se vyhodnocují charakteristiky elementů vytvořených podle Gausse, nebo podle normy ČSN EN ISO 5459, která předepisuje použití tangenty. Pro ukázkou těchto vlivů se bude vyhodnocovat kolmost válce (A) na rovinu (B) a naopak podle přílohy A. Experiment je prováděn na CMM stroji Wenzel LH 65 X3M Premium (obr. 2).

- Měřicí rozsah:
  - Osa X: 650 mm
  - Osa Y: 1000 mm
  - Osa Z: 500 mm
- Snímací systém:
  - Motorická indexovatelná hlavička: PH 10M
  - Měřicí sonda: SP25, modul SM25 – 1
  - Průměr dotyku: 4 mm
  - Délka dotyku: 30 mm
- Maximální nejistota měření:  $MPEE = 1,6 \mu\text{m} + (L/350 \text{ mm})$ , kde L je v mm
- Maximální nejistota snímání:  $MPEP = 1,6 \mu\text{m}$
- Výkonnost skenování:  $MPEthp = 2,2 \mu\text{m}$  (SP25)
- Měřicí software: Metrosoft QUARTIS R6

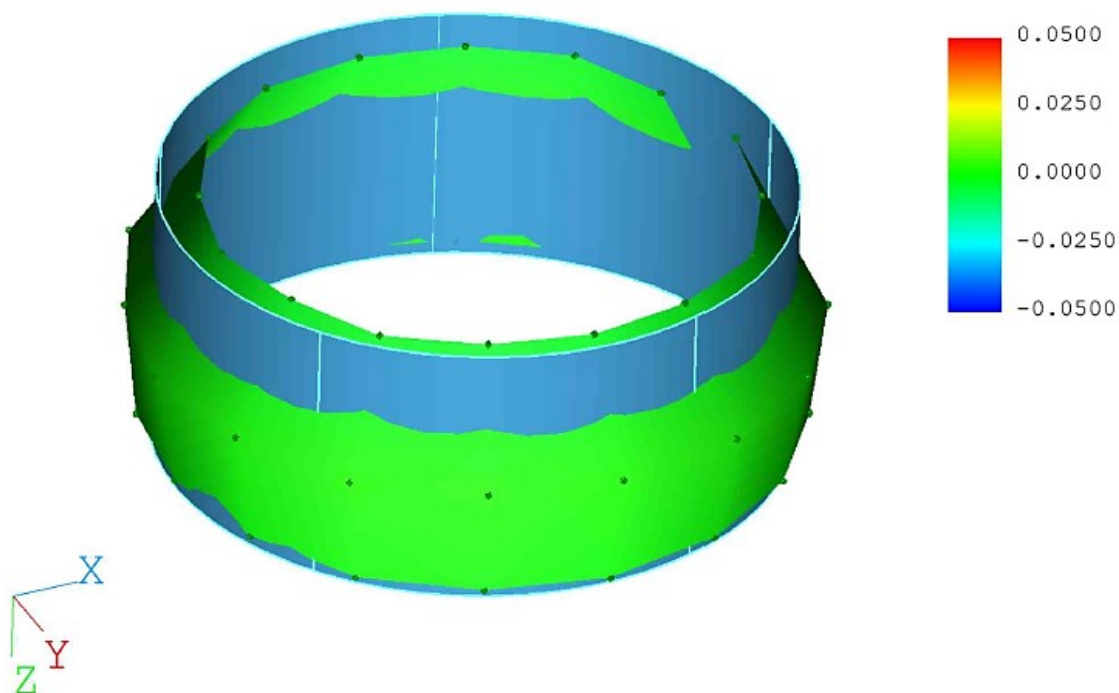
Měření je prováděno na válcovité součásti s dírou (obr. 39).



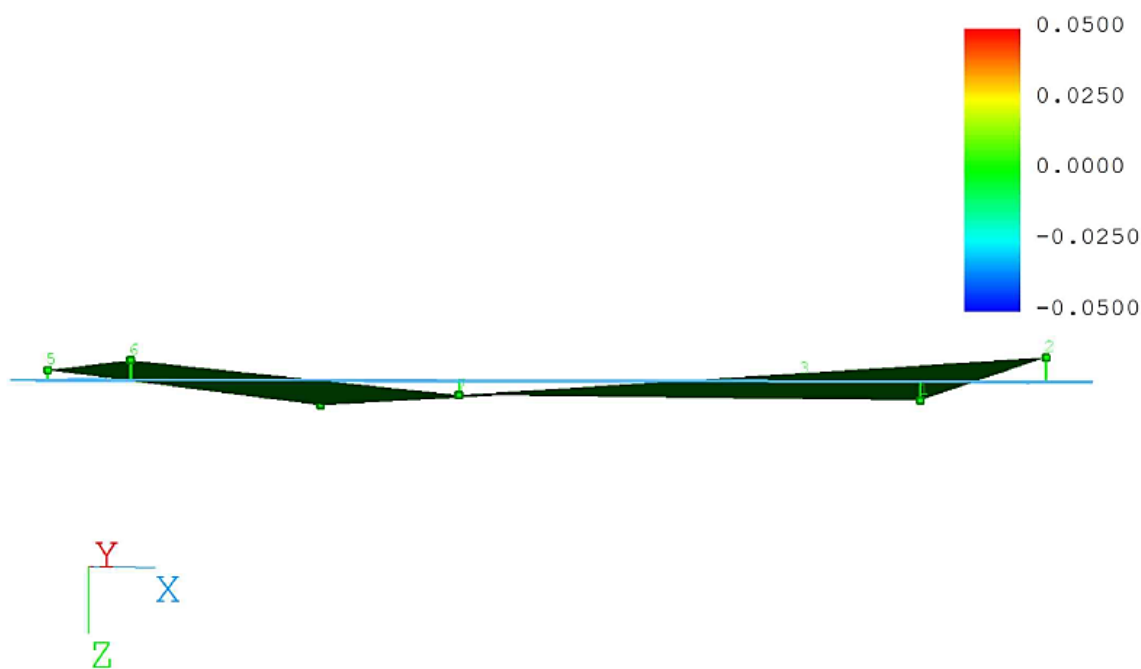
Obr. 39 Válcová součást s dírou

## 4.1 Vyhodnocování podle Gausse

Po nasnímání dostatečného počtu bodů (ve 3 řezech po 16 bodech s odstupem řezů 17 mm) pro vytvoření válce a roviny (8 bodů v kruhu), jejichž kolmost se vyhodnocuje, se těmito body proložil element válce a element roviny vypočtený podle Gausse. Tyto elementy jsou zobrazeny na obr. 40 a 41.



Obr. 40 Element (válce) podle Gausse[Příloha B]



Obr. 41 Element (roviny) podle Gausse[Příloha B]

Na obr. 40 je zobrazen (modrý) vypočtený element (válec) podle Gausse a skutečný (zelený) tvar snímaného válce. Gaussova metoda vypočítaný element proloží mezi nasnímané body, a protože skutečný (zelený) tvar není dokonalý, lze pozorovat, jak se skutečný element kulatí. Výpočet elementů podle Gausse je více zpracován v kapitole 1.8 Princip a strategie měření.

Ten samý případ je zobrazen na obr. 41, kde je skutečný (zelený) tvar roviny proložen vypočtenou (modrou) rovinnou podle Gausse.

Vyhodnocení charakteristik elementů A a B (válcovitost, průměr válce a rovinnost roviny) a vyhodnocení kolmosti je zobrazeno v tab. 12.

Tab. 12 Vyhodnocení charakteristik elementů[Příloha B]

Charakteristika	Nominální hodnota	Tolerance	Aktuální hodnota	Odchylka
Průměr válce	38.0000	$\pm 0.0500$	37.9661	-0.0339
Válcovitost	0.0000	0.0200	0.0054	0.0054
Rovinnost	0.0000	0.0200	0.0017	0.0017
Kolmost A – B	0.0000	0.0200	0.0053	<b>0.0053</b>
Kolmost B – A	0.0000	0.0200	0.0024	<b>0.0024</b>

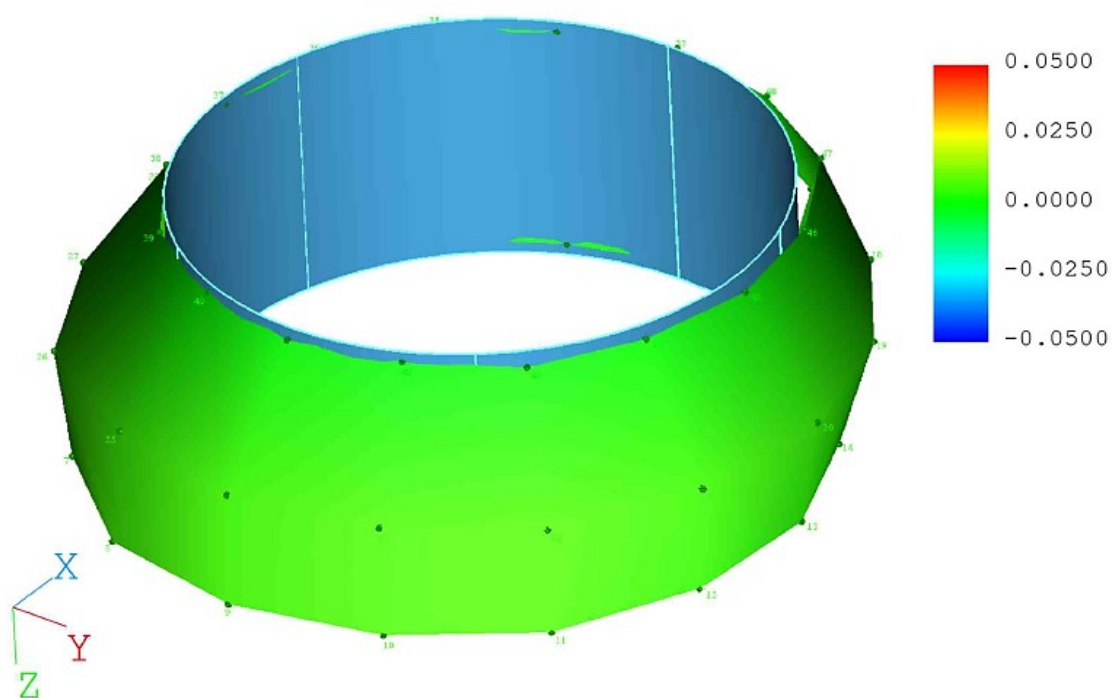
Z tab. 12 je patrné, že všechny vyhodnocované charakteristiky se vešly do tolerance. Ovšem zajímavý je fakt, že odchylka kolmosti elementu A (válec) na element B (rovina) je větší než odchylka kolmosti elementu B (rovina) na element A (válec). Z tohoto důvodu je opravdu důležité vyhodnocovat charakteristiky elementů tak, jak je zakresleno na přiloženém výkresu – příloha A.

## 4.2 Vyhodnocování podle ČSN EN ISO 5459

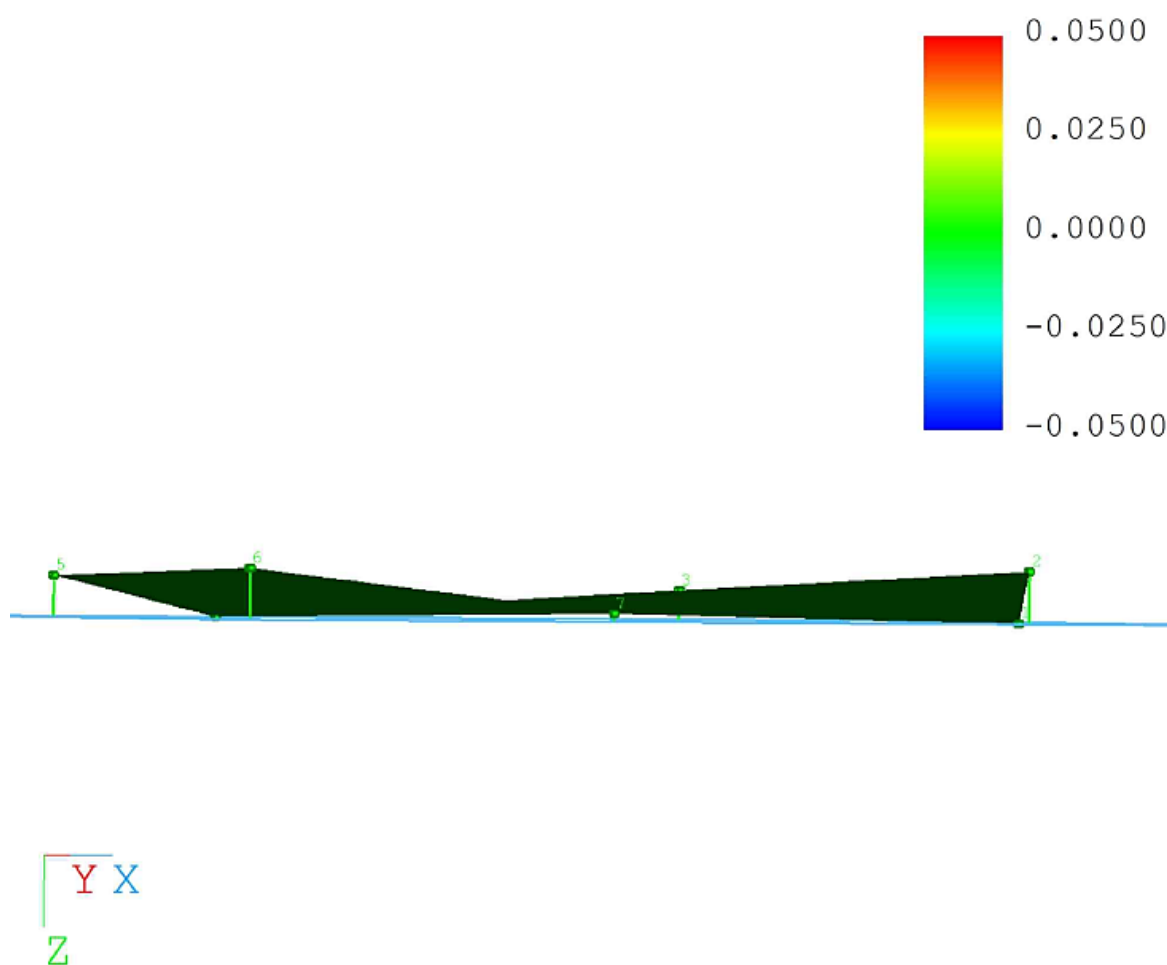
Norma ČSN EN ISO 5459 stanovuje, že při vyhodnocování charakteristik elementů se elementy vypočtou pomocí tangenty k nasnímaným bodům. Tato metoda je dále popsána v kapitole 1.8 Princip a strategie měření.

Na obr. 42 je zobrazen vypočtený (modrý) element a skutečný (zelený) element. Vypočtený element se nachází uvnitř skutečného a všechny nasnímané body leží vně vypočteného elementu, takže se opravdu jedná o tangenciální element. Skutečný element byl použit stejný, jako v případě Gaussovi metody, tedy válec, který byl nasnímán ve 3 řezech po 16 bodech s odstupem řezů 17 mm a rovina nasnímaná 8 body v kruhu.

Na obr. 43 je zobrazen vypočtený (modrý) element jako tangenta ke skutečnému elementu. Vypočtený element tedy neleží skrze nasnímané body.



Obr. 42 Element (válce) podle ČSN EN ISO 5459[Příloha B]



Obr. 43 Element (roviny) podle ČSN EN ISO 5459[Příloha B]

Vyhodnocení charakteristik elementů A a B (válcovitost, průměr válce, rovinnost roviny, kolmost) vytvořených podle normy ČSN EN ISO 5459 je uvedeno v tab. 13.

Tab. 13 Vyhodnocení charakteristik elementů[Příloha B]

Charakteristika	Nominální hodnota	Tolerance	Aktuální hodnota	Odchylka
Průměr válce	38.0000	$\pm 0.0500$	37.9605	-0.0395
Válcovitost	0.0000	0.0200	0.0064	0.0064
Rovinnost	0.0000	0.0200	0.0015	0.0015
Kolmost A – B	0.0000	0.0200	0.0035	<b>0.0035</b>
Kolmost B – A	0.0000	0.0200	0.0016	<b>0.0016</b>

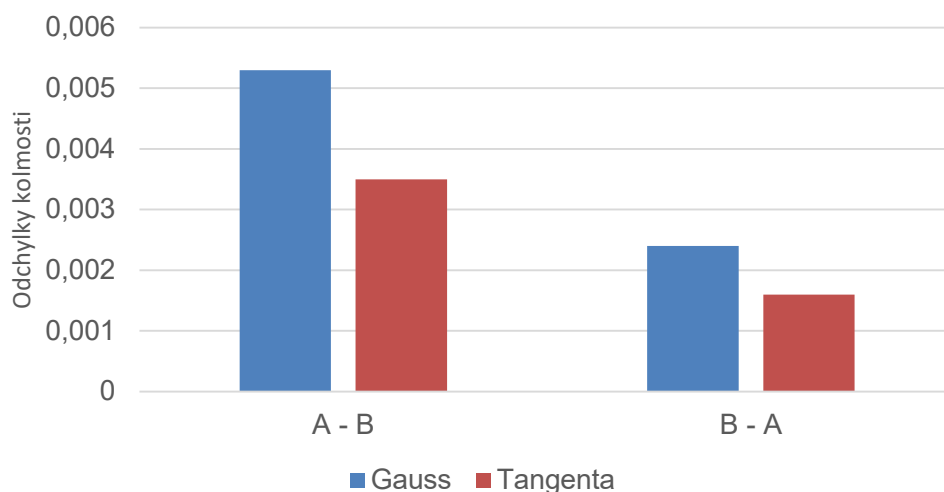
Z výsledků uvedených v tab. 13 je vidět, že se všechny odchylky vyhodnocovaných charakteristik vešly do velikosti tolerance. Opět si lze povšimnout, že odchylka kolmosti elementu B na A je menší než odchylka kolmosti elementu A na B.

### 4.3 Srovnání obou metod

Jestliže je bráno v potaz, že české technické normy nejsou brány jako právní předpisy a není stanovena povinnost je dodržovat, nelze s určitostí říci, která z těchto metod je správná a která nikoliv. Záleží na obsluhujícím technikovi, aby dle zkušeností a vlastního uvážení zvolil postup vyhodnocování.

Po srovnání informací z tab. 12 a tab. 13, bylo zjištěno, že v tomto experimentu jsou odchylky průměru válce a válcovitosti menší u metody podle Gausse než u metody podle normy ČSN EN ISO 5459. Vzhledem k tomu, že je element vypočtený podle tangenty k nasnímaným bodům, pak extrémní hodnoty těchto bodů mohou způsobit zkreslení a je doporučeno je odfiltrovat. Naopak odchylky rovinnosti a **kolmosti A – B a B – A** jsou **menší** u postupu podle normy ČSN EN ISO 5459 než u Gausse. Srovnání odchylek kolmosti lze vidět na obr. 44.

Velmi důležité je však přistupovat ke každé součásti individuálně, protože se mohou lišit nejen ve tvaru a velikosti, ale také v materiálu, ze kterého jsou vyrobeny a také v postupu, podle kterého byly vyrobeny. To může mít za následek rozdílné výsledky ve vyhodnocování a je nutno na tuto skutečnost brát zřetel.

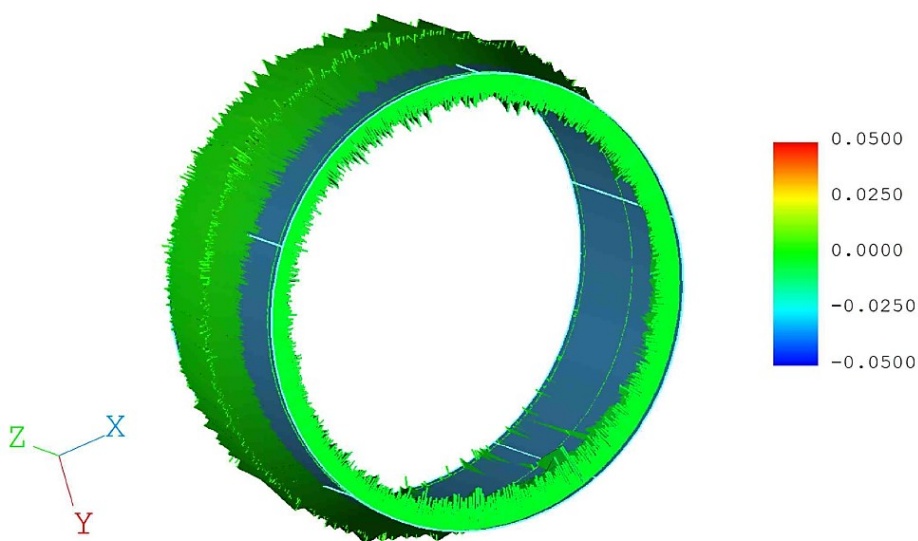


Obr. 44 Graf odchylek kolmosti A – B a B – A

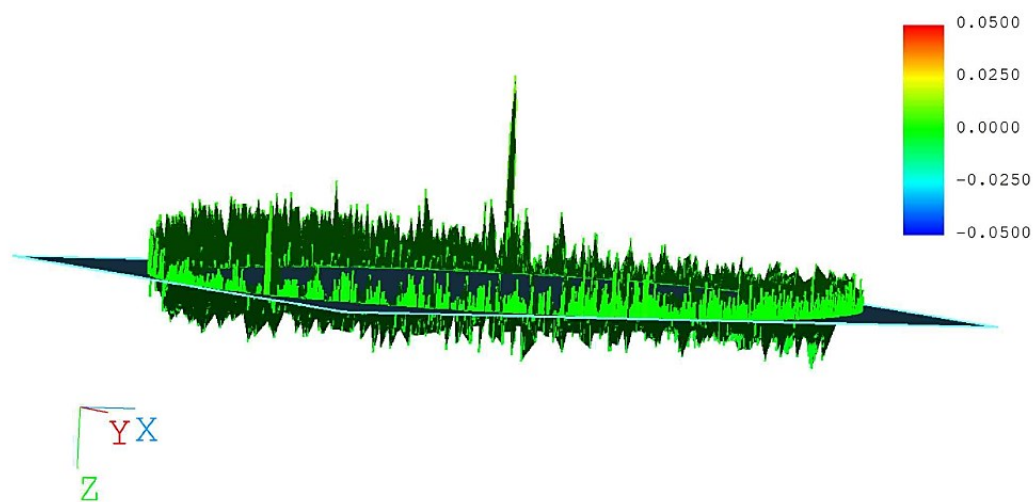
Z grafu je patrné, že odchylky kolmosti jsou menší podle normy než podle Gausse. Metoda podle normy je viditelně lepší pro výrobu, neboť podává menší odchylky, avšak je potřeba dávat pozor na extrémní hodnoty, ze kterých je tangenta vytvořena.

#### 4.4 Ukázka skenovací metody

Celé měření tohoto experimentu bylo provedeno nespojitou (diskrétní) metodou, protože CMM stroj Wenzel LH 65 X3M Premium, na kterém byl experiment měřen, má maximální nejistotu bodového snímání  $1,6\ \mu\text{m}$ , která je nižší než výkonnost skenování  $2,2\ \mu\text{m}$ , a také proto, že se tato práce na kontaktní metodu zaměřuje. Avšak pro ukázkou skenovací metody a hustoty počtu naskenovaných bodů v krokové vzdálenosti  $0,1\ \text{mm}$  je válec a rovina naskenována na obr. 44 a 45.



Obr. 45 Skenovací metoda – válec[Příloha B]



Obr. 46 Skenovací metoda – rovina[Příloha B]

## Závěr

Bakalářská práce měla za úkol seznámit čtenáře se základními a jejich vlivem na výsledky hodnocení požadovaných geometrických tolerancí. V experimentální části se pak prováděla praktická ukázka měření jednoduchého válce s otvorem, který je nakreslen na příloze A.

Pro praktickou ukázku vlivu volby základny pro vyhodnocování je použita jako geometrická tolerance kolmost válce na rovinu podstavy a naopak. Po nasnímání válce s průměrem 38 mm a jeho podstavy je ověřeno, zda průměr válce je v požadované toleranci  $\pm 0.05$  mm, dále pak zda je dosažena válcovitost válce v toleranci 0,02 mm a zda je dodržena rovinnost roviny v toleranci 0,02 mm.

Toto ověřování se provádí na vypočtených elementech, které jsou stanoveny podle dvou zkoumaných metod. Metody podle Gausse a metody, kterou požaduje norma ČSN EN ISO 5459, jako tangenciální element. Hlavní zkoumaná geometrická tolerance, kolmost, je taktéž vyhodnocována z elementů vypočtených podle Gausse a podle normy ČSN EN ISO 5459.

Z výsledků z tab. 12 a 13 je patrné, že všechny vyhodnocované odchylky vyhovují požadované toleranci, avšak výsledky podle Gausse a podle normy se liší. Na základě této skutečnosti a také na tom, že normy nejsou závazné, lze usuzovat, že volba metody vypočtení elementů je na obsluhujícím technikovi, jeho zkušenostech a zvyklostech.

Odchylky kolmosti A – B a B – A se také liší. V tomto případě je ale nutno volit pořadí primární a sekundární základny tak, jak to předepisuje příloha A – výkres válcové součásti s dírou.

Experiment prokázal, že norma doporučuje obalový prvek. Jen ve výjimečných případech, které vyžadují jiný přístup, než obalový prvek lze použít metodu připasování nejmenších čtverců (Gauss). Je třeba brát v úvahu i vizuální stránku obrobku, aby se předešlo nepředvídaným chybám při měření. Je potřeba také proškolení obsluhujícího technika, který podává výsledky o měření.



## Seznam použité literatury

- [1] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Metrologie a řízení kvality: učební text*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2771-1. 143 s.
- [2] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [3] ČSN EN ISO 1101. *Geometrická specifikace výrobků – Geometrické tolerování – Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Praha: Leden 2014. 120 s.
- [4] ČSN EN ISO 5459. *Geometrická specifikace produktu (GPS) – Geometrické tolerování – Základny a soustavy základen*. Praha: Duben 2012. 80 s.
- [5] ZELINKA, J. *Závislost naměřené hodnoty na velikosti snímacího dotyku: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 47 stran, 8 příloh. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.
- [6] Hrbková, E. *Problematika měření obecných tvarových ploch s využitím CMM: bakalářská práce*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016, 71 stran.
- [7] Hexagon Metrology. [online] [www.hexagonmetrology.cz](http://www.hexagonmetrology.cz)
- [8] DRASTÍK, F. *Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem. Tolerování rozměrů a geometrických vlastností*. Montanex 1996. 271 s.
- [9] Tomášek, V. *Analýza metod měření přesnosti železničních náprav: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie 2015, 53 s. Vedoucí práce: Ing. Čepová, L. Ph.D.
- [10] SIGMUND, Marek. *Strategie hodnocení odchylky kruhovitosti na třísouřadnicovém měřicím stroji: autoreferát doktorské disertační práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 9788024822846.

- 
- [11] Metrosoft QUARTIS® R15 – Uživatelská příručka. 2015 Wenzel Mertomec AG, Chur.
- [12] MIZERA, Ondřej. *Vliv velikosti snímacího dotyku na odchylku kruhovitosti* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2016-05-08]. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Trend výrobní přesnosti[1,2] .....	10
Obr. 2 CMM WENZEL LH 65[5].....	11
Obr. 3 Základní části souřadnicového měřicího stroje[1,2] .....	12
Obr. 4 Typy souřadnicových měřicích strojů[1,2].....	14
Obr. 5 Základní rozdělení souřadnicových měřicích strojů[1,2] .....	15
Obr. 6 Rozdělení snímacích systémů[6] .....	20
Obr. 7 Snímací hlavice firmy Hexagon[7] .....	22
Obr. 8 Rozměry dotyku[2].....	22
Obr. 9 Materiály snímacích kuliček[2] .....	23
Obr. 10 Materiály stopky[2].....	24
Obr. 11 Zdroje nepřesností souřadnicových měřicích strojů[2] .....	25
Obr. 12 Princip souřadnicového měření[2] .....	29
Obr. 13 Definice elementů a charakteristik[2] .....	30
Obr. 14 Vliv metody připasování na skutečný naměřený element[11].....	31
Obr. 15 Metoda připasování podle Gausse[11] .....	32
Obr. 16 Metoda připasování podle Chebycheva[11].....	32
Obr. 17 Minimálně opsaný element[11] .....	33
Obr. 18 Maximálně vepsaný element[11] .....	33
Obr. 19 Tangenciální největší možný element[11].....	33
Obr. 20 Tangenciální nejmenší možný element[11].....	33
Obr. 21 Obalový prvek[8].....	38
Obr. 22 Střední prvek[8] .....	38
Obr. 23 Dotykový prvek[8] .....	38
Obr. 24 Základnou je osa válce opsaného velkému průměru závitu d.[8] .....	41
Obr. 25 Soustava základen[8] .....	42
Obr. 26 Značení soustavy základen a jejich pořadí[8] .....	42
Obr. 27 Primární A, sekundární B[8].....	42
Obr. 28 Primární B, sekundární A[8].....	42
Obr. 29 Skutečný tvar - primární A, sekundární B[8].....	43
Obr. 30 Skutečný tvar - primární B, sekundární A[8].....	43
Obr. 31 Soustava základen na součásti složená z různých základen[8] .....	43
Obr. 32 Značení dílčích základen podle normy ISO 5459[4].....	44
Obr. 33 S otočným vřetenem[12].....	46
Obr. 34 S otočným stolem[12] .....	46
Obr. 35 S rotací mezi dvěma hroty[10] .....	46

Obr. 36 Relativní metody[12].....	47
Obr. 37 Skenovací metoda[10].....	47
Obr. 38 Body nasnímané nespojitou metodou[5, 10, 12].....	48
Obr. 39 Válcová součást s dírou.....	49
Obr. 40 Element (válce) podle Gausse[Příloha B] .....	50
Obr. 41 Element (roviny) podle Gausse[Příloha B] .....	50
Obr. 42 Element (válce) podle ČSN EN ISO 5459[Příloha B] .....	52
Obr. 43 Element (roviny) podle ČSN EN ISO 5459[Příloha B] .....	52
Obr. 44 Graf odchylek kolmosti A – B a B – A .....	54
Obr. 45 Skenovací metoda – válec[Příloha B] .....	54
Obr. 46 Skenovací metoda – rovina[Příloha B].....	55

## Seznam tabulek

Tab. 1 Přehled geometrických tolerancí[5] .....	26
Tab. 2 Přímost[9].....	27
Tab. 3 Kruhovitost[9] .....	27
Tab. 4 Válcovitost[9].....	28
Tab. 5 Soustřednost[9] .....	28
Tab. 6 Kolmost plochy vůči ose a kolmost středící čáry vůči vztažené rovině[9].....	28
Tab. 7 Minimum potřebných bodů pro definování elementu[6] .....	30
Tab. 8 Použití metod připasování[11] .....	33
Tab. 9 Použití metod připasování[11] .....	34
Tab. 10 Přehled označení základních prvků a základen[8] .....	39
Tab. 11 Přehled označení základních prvků a společných základen[8] .....	40
Tab. 12 Vyhodnocení charakteristik elementů[Příloha B] .....	51
Tab. 13 Vyhodnocení charakteristik elementů[Příloha B] .....	53

## Seznam příloh

Příloha A – Výkres válcové součásti s dírou

Příloha B – Protokol z měření na stroji WENZEL LH 65 X3M Premium